

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний факультет

Кафедра наукових, аналітичних та екологічних приладів і систем

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

В.о. завідувача кафедри

_____ Защепкіна Н.М.

«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка»

на тему: «Удосконалення фотоприймального пристрою на довжину
хвилі 1,54 мкм далекоміра спеціального призначення »

Виконав :

студент VI курсу, групи ПН-71

Мельник Владислав Костянтинович _____

Керівник:

Професор д.т.н. Маслов В.П. _____

Консультант _____

Рецензент: _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент (-ка) _____

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація на тему «Удосконалення фотоприймального пристрою на довжину хвилі 1,54 мкм далекоміра спеціального призначення», 100 с., 27 рисунки, 13 таблиць, 53 джерела.

Актуальність роботи. У сучасних військових операціях вирішальним є збільшення точності та дальності пострілів. Тому тема досліджень є актуальною, а в її розробці будуть враховані вимоги до сучасних систем.

Метою даної роботи є: вдосконалення фотоприймального пристрою лазерного далекоміра спеціального призначення на довжину хвилі 1,54 мкм.

Задачі роботи:

1. Проаналізувати існуючі фотоприймальні пристрої лазерних далекомірів та технологічні методи їх виготовлення.

2. Дослідити способи підвищення чутливості фотоприймального пристрою.

3. Провести роботи по вдосконаленню фотоприймального каналу та дослідити параметри отриманих експериментальних зразків.

4. Виміряти параметри фотоприймача та прослідкувати як вони змінюються з часом.

Об'єкт дослідження – процес фотометрії швидкодіючим р- і n-фотодіодом.

Предмет дослідження – Фотоприймальний пристрій лазерного далекоміра.

Методи дослідження — загальнонаукові фізичні методи, методи системного і порівняльного аналізу.

Наукова новизна. Вдосконалено фотоприймальний пристрій на довжину хвилі 1,54 мкм, що дозволяє збільшити точність та дальність

пострілів, а також дозволяє перейти на більш безпечний для очей діапазон.

Практична значимість. Вперше застосовано в якості пасивуючого покриття для германієвого фотодіоду ZnS(цинк селен), досліджено параметри фотоприймача. Дослідження показали низьку деградацію параметрів фотоприймача з часом. Нанесено просвітлюючий шар на кремнієвий світлофільтр, що підвищує чутливість фотоприймача.

Ключові слова: далекомір, фотоприймач, ІЧ-випромінювання, конструкторські схемні рішення, стабільність характеристик, чутливість параметрів.

SUMMARY

Master's dissertation on the topic "Improvement of the photodetector at a wavelength of 1.54 microns for a special purpose range finder", 100 p., 27 figures, 13 tables, 53 references.

Urgency of work. In modern military operations, it is crucial to increase the accuracy and range of shots. Therefore, the topic of research is relevant, and its development will take into account the requirements for modern systems.

The purpose of this work is to: improve the photodetector device of a laser range finder of a special purpose at a wavelength of 1.54 microns.

Tasks of work:

1. To analyze existing photodetectors of laser range finders and technological methods of their manufacture.
2. Explore ways to increase the sensitivity of the photo-receiver device.
3. Carry out work on perfection of the photodirectional channel and to study the parameters of the received experimental samples.
4. Measure the parameters of the photodetector and see how they change over time.

The object of the study is the process of photometry with a high-speed p- and n-photodiode.

Subject of research - Photoconductive laser range finder.

Methods of research - general scientific physical methods, methods of system and comparative analysis.

Scientific novelty. The photoconductive device has been improved with a wavelength of 1.54 microns, which increases the accuracy and range of shots, and also allows you to switch to a more safe eye area.

Practical significance. It was first applied as a passivating coating for a germanium photodiode ZnS (zinc selenium), and the parameters of the photoconductor were investigated. Studies have shown a low degradation of the photodetector parameters over time. A clarifying layer is applied to a silicon filter,

which increases the sensitivity of the photodetector.

Keywords: range finder, photodetector, infrared radiation, design circuit design, stability of characteristics, sensitivity of parameters.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1. ТЕНДЕНЦІЇ В РОЗВИТКУ ЛАЗЕРНИХ ДАЛЕКОМІРІВ ТА ЇХ ФОТОПРИЙМАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ	9
1.1 Особливості конструкції і принцип роботи. Види і застосування лазерних далекомірів.....	13
1.2 Приклади технічної реалізації сучасних далекомірів.....	30
1.3 Фотоприймачі та фотоприймальні пристрої.....	34
1.4 Основні параметри фотоприймачів.....	37
1.5 Шумові і порогові параметри фотоприймачів.....	39
1.6 Характеристики фотоприймачів.....	41
1.7 Визначення порогових потоків, які реєструються фотоприймальними пристроями лазерного далекоміра.....	42
Висновки до розділу.....	50
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ ФОТОПРИЙМАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ.....	51
2.1 Відомі дослідження фотоприймачів на основі германію для діапазону 1,5-1,7 мкм.....	66
2.2 Експериментальні зразки і методика експерименту.....	68
2.3 Виготовлення та пасивація розроблених Ge p-n переходів	72
Висновок до розділу.....	79
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕГРАДАЦІЇ ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНИХ ЗРАЗКІВ	80
3.1 Дослідження можливої деградації експериментального зразка фотодіодного приймача.....	80
3.2 Дослідження підвищення чутливості фотодіодного приймача	83
3.3 Виготовлення та випробування двох нових експериментальних елементів.....	84
Висновок до розділу.....	92

Висновок.....	94
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	95

ВСТУП

Завдання вимірювання відстані між двома об'єктами була актуальною завжди, проте в даний час її значимість в техніці особливо зросла, що зумовлено необхідністю високоточного позиціонування об'єктів в будівництві, геодезії, військовій справі, навігації і т. п. При цьому в різних областях використання далекомірів постійно підвищуються вимоги до точності, граничної вимірюваної дальності, темпу вимірювань, масою і габаритами апаратури. Так, на ринку цивільних далекомірів з'явилися прилади, здатні вимірювати відстані до 200 м з похибкою $\pm 1,5$ мм. У військовій області вже впроваджені і використовуються далекоміри авіаційного базування з граничною вимірюваною дальністю понад 50 км. З'явилися прилади нового класу - скануючі далекоміри, що дозволяють формувати матрицю діяльностей з подальшим синтезом комп'ютерної 3D-моделі зондуючого об'єкта.

Далекомір - пристрій, призначений для визначення відстані від спостерігача до об'єкта. Використовується в геодезії, для наведення на різкість в фотографії, в прицільних пристосуваннях зброї, системах танках і т. д.

Всі далекоміри можна розбити на дві групи:

1) активні далекоміри, що використовують в процесі вимірювання дальності підсвідчування об'єкта за допомогою випромінювання лазера або світлодіода;

2) пасивні далекоміри, принцип дії яких заснований на триангуляційному (параллаксному) методі. Далекіри даної групи широко використовувалися в фототехніці «доцифрової» ери, але не забезпечували ні високої точності, ні великої дальності. У свою чергу, активні далекоміри за функціональною ознакою можна розбити на три типи:

1) лазерні імпульсні далекоміри, що визначають дальність за часом поширення лазерного імпульсу до об'єкта і назад;

2) лазерні фазові далекоміри, що вимірюють дальність шляхом визначення зсуву фази гармонійного модульованого оптичного випромінювання лазера або світлодіода по відношенню до опорного коливання;

3) інтерференційні лазерні далекоміри, принцип дії яких заснований на підрахунку інтерференційних смуг при переміщенні реперного світлоповертального елемента від нульового положення до необхідного. Такі прилади мають обмежену область застосування внаслідок необхідності використання репера, а також малої вимірюваної дальності, хоча і володіють дуже високою точністю (більше 1 мкм). Далекіміри такого типу застосовують при високоточному технологічному контролі різних об'єктів.

Метою даної роботи є: вдосконалення фотоприймального пристрою лазерного далекоміра спеціального призначення на довжину хвилі 1,54 мкм.

Актуальність роботи. У сучасних військових операціях вирішальним є збільшення точності та дальності пострілів. Тому тема досліджень є актуальною, а в її розробці будуть враховані вимоги до сучасних систем.

Практична значимість. Вперше застосовано в якості пасивуючого покриття для германієвого фотодіода ZnS(цинк селен), досліджено параметри фотоприймача. Дослідження показали низьку деградацію параметрів фотоприймача з часом. Нанесено просвітлюючий шар на кремнієвий світлофільтр, що підвищує чутливість фотоприймача.

Задачі роботи:

1. Проаналізувати існуючі фотоприймальні пристрої лазерних далекомірів та технологічні методи їх виготовлення.

2. Дослідити способи підвищення чутливості фотоприймального пристрою.

3. Провести роботи по вдосконаленню фотоприймального каналу та дослідити параметри отриманих експериментальних зразків.

4. Виміряти параметри фотоприймача та прослідкувати як вони змінюються з часом.

Об'єкт дослідження – процес фотометрії швидкодіючим р- і n-фотодіодом.

Предмет дослідження – Фотоприймальний пристрій лазерного далекоміра.

Наукова новизна. Вдосконалено фотоприймальний пристрій на довжину хвилі 1,54 мкм, що дозволяє збільшити точність та дальність пострілів, а також дозволяє перейти на більш безпечний для очей діапазон.

РОЗДІЛ 1. ТЕНДЕНЦІЇ В РОЗВИТКУ ЛАЗЕРНИХ ДАЛЕКОМІРІВ ТА ЇХ ФОТОПРИЙМАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

Далекомірні пристосування діляться на активні і пасивні:

Активні:

- світловий далекомір;
- звуковий далекомір;
- лазерний далекомір;

Пасивні:

- далекоміри, використовуючі оптичний паралакс (напр. далекомірний фотоапарат);
- далекоміри, що використовують зіставлення об'єкта будь-якого зразку (нитяний далекомір і т.д.);

Принцип дії далекомірів активного типу полягає у вимірі часу, який витрачає посланий далекоміром сигнал для проходження відстані до об'єкту і назад. Швидкість поширення сигналу (швидкість світла або звуку) вважається відомою.[1]

Вимірювання відстаней дальномерами пасивного типу ґрунтується на визначенні висоти h рівнобедреного трикутника ABC , наприклад по відомій стороні $AB = l$ (базі) і протилежного гострого кута b (т. Н. Параллактическому кутку). При малих кутах b (виражених в радіанах)

$$h = l / b \quad (1.1)$$

Одна из величин, l или b , обычно является постоянной, а другая -- переменной (измеряемой). По этому признаку различают дальномеры с постоянным углом и дальномеры с постоянной базой.

Лазерна дальнометрія є однією з перших областей практичного застосування лазерів у закордонній військовій техніці. Перші дослідження

відносяться до 1961 року, а зараз лазерні далекоміри використовуються і в наземній військовій техніці (артилерійські, танкові), і в авіації (далекоміри, висотоміри, цілевказівники), і на флоті. Ця техніка пройшла бойові випробування у В'єтнамі і на Близькому Сході. В даний час ряд далекомірів прийнятий на озброєння в багатьох арміях світу.

Система управління вогнем (СУО) є одним з найважливіших елементів комплексу озброєння, багато в чому визначають його технічний рівень і бойові можливості, а також тактичні умови застосування бойової машини. Тому створення нових і модернізація існуючих систем управління вогнем залишається одним з головних напрямків діяльності фахівців з приладобудування як зарубіжних фірм, так і в Україні. [1-5]

В даний час одним з найважливіших факторів підвищення бойової ефективності сучасних бойових броньованих машин є вдосконалення прицільних комплексів системи управління вогнем. Технічні вимоги, що пред'являються до прицільних комплексів, впливають із завдань розв'язуваних екіпажем. На прикладі основного бойового танка ці основні завдання наступні:

- отримання інформації по бойовій обстановці і пошук цілей;
- виявлення і розпізнавання цілей використовуючи природні і штучні засоби маскування, активні і пасивні перешкоди виявлення;
- швидке наведення зброї на ціль при підготовці до стрільби;
- забезпечення точної стрільби і поразки цілей на всіх дистанціях бою;

Аналіз розвитку систем прицілювання танків передових країн світу показав, що на танках Абрамс (США) та Леопард (Німеччина) мають далекомірні лазерні системи з наступними параметрами [Ошибка! Источник ссылки не найден.]:

лазер Nd-YAG

$\lambda = 1,06 \text{ мкм}$

Двим = 0,2-7,9км. (для Леопард Двим = 0,2-9,9км)

Помилка±10м

Розвиток вітчизняного приладобудування для танків [2] було викликано роботами ДП ХКБМ ім. О.О. Морозова (м.Харків) над новим українським танком «Оплот» і направлено на подальшу модернізацію прицільного комплексу командира ПНК-4С в частині підвищення ефективності СУО в порівнянні з танком Т-80. Модернізація прицільного комплексу командира (комплекс ПНК-5) була виконана в напрямку розширення функціональних можливостей в порівнянні з аналогом ПНК-4С.

Впровадження комплексу ПНК-5 в СУО танка дозволило підвищити ефективність прицільної стрільби командира в режимі дубльованого керування і отримати ряд переваг в порівнянні з прицільним комплексом ПНК-4С, в тому числі:

- можливість вимірювання дальності до цілі за допомогою лазерного далекоміра підвищило ефективність і автономність командира танка, розширило його можливості з пошуку цілей і видачі цілевказівки;

- введення далекоміра і УВБУ дозволило інтегрувати приціл командира з танковим балістичним обчислювачем і за рахунок автоматичного введення кутів прицілювання і попередження скоротити час на підготовку пострілу до 15%;

- застосування ЕОП нового покоління підвищило якість зображення в нічному каналі, а дальність виявлення цілі в пасивному режимі спостереження склала не менше 800 м.

Лазерний далекомір – прилад для вимірювання відстаней із застосуванням лазерного променя. Широко застосовується в інженерній геодезії, при топографічній зйомці, у військовій справі, в навігації, в астрономічних дослідженнях, у фотографії. Лазерний далекомір - це пристрій, що складається з імпульсного лазера і детектора

випромінювання. Вимірюючи час, який витрачає промінь на шлях до відбивача і назад і знаючи значення швидкості світла, можна розрахувати відстань між лазером і відображаємим об'єктом.

Імпульсні лазерні далекоміри мають велику дальність роботи, тому що імпульс можна видати з великою потужністю і підвищеною скритністю, включаючись тільки на час імпульсу. Тому імпульсні лазерні далекоміри зазвичай застосовуються у військових прицілах.

Фазові лазерні далекоміри на короткий проміжок часу включають підсвітку об'єкта з різною модульованою частотою і по зрушенню фази обчислюють відстань до цілі. Вони не мають таймера виміру відбитого сигналу, тому дешевше, але мають меншу дальність (до 1 км) і тому зазвичай використовуються в побутових цілях або як приціли стрілецької зброї.

1.1 Особливості конструкції і принцип роботи. Види і застосування лазерних далекомірів

У Патентні Російської Федерації №2008 127 875 від 20.01.2010 «Оптически накачиваемый световодный лазер с улучшенной эффективностью» [3] описаний оптично накачуваний світловодний лазер, який містить:

світловод з оптичним передавальним шаром (3, 4) між двома резонаторними дзеркалами (6, 7) для формування об'ємного резонатора, причому згаданий передавальний шар (3, 4) складається з посилюючого середовища, щонайменше, уздовж однієї ділянки згаданого світловода, і, причому згадане посилююче середовище забезпечує перетворення, що підвищує або знижує частоту падаючого світла накачування, причому перше зі згаданих резонаторних дзеркал (6), щонайменше, частково прозоро для світла накачування, так, щоб дозволити торцеве накачування світлолідного лазера через першу торцеву поверхню (8) згаданого

світловода, і причому ширина згаданого передавального шару (3, 4) між згаданими двома резонаторними дзеркалами (6, 7) зменшується на першій ділянці світловода від згаданої першої торцевої поверхні (8) до другої торцевої поверхні (9), що відрізняється тим, що на першій ділянці передавальний шар (3, 4) складається з матеріалу, що відрізняється від підсилюючого середовища, і цей матеріал не поглинає світло накачування або має коефіцієнт поглинання для світла накачування нижче такого для підсилюючого середовища.

2. Світловідний лазер по п.1, що відрізняється тим, що світловідний лазер (2) приєднаний до діодного лазера або діодної лазерної лінійки (1) для торцевого накачування світловідного лазера (2) згаданим доданими лазером або діодною лазерною лінійкою (1).

3. Світловідний лазер по п.2, що відрізняється тим, що діодний лазер або діодна лазерна лінійка (1) випромінює світло накачування в ІЧ або синій області довжин хвиль.

4. Світловідний лазер по п.2, що відрізняється тим, що згадана ширина згаданого передавального шару (3, 4) зменшується в напрямку повільної осі світла накачування.

5. Світловідний лазер по п.1 або 4, який відрізняється тим, що згадана ширина зменшується відповідно до геометричної форми складеного параболічного концентратора (СПК).

6. Світловідний лазер по п.1 або 4, який відрізняється тим, що згадана ширина зменшується лінійно.

7. Світловідний лазер по п.1, що відрізняється тим, що передаючий шар має постійну ширину або поперечний переріз вздовж другої ділянки світловода, причому згадана друга ділянка з'єднує між собою першу ділянку і другу торцеву поверхню (9) світловода.

8. Світловідний лазер по п.7, що відрізняється тим, що передаючий шар складається з підсилюючого середовища по всій другій ділянці.

9. Світловідний лазер по п.1 або 4, який відрізняється тим, що підсилюче середовище являє собою Er-легований ZBLAN і тим, що світловідний лазер (2) приєднаний до діодного лазера або діодної лазерної лінійки (1) для торцевого накачування світловідного лазера (2) згаданим доданими лазером або діодною лазерною лінійкою (1), який випромінює світло накачування в ІЧ спектральному діапазоні.

У Патентні Російської Федерації №164 950 від 27.09.2016 р. «Перестраиваемый твердотельный лазер среднего ИК-диапазона с продольной накачкой диодной линейкой» [4]. Корисна модель відноситься до лазерної техніки, а саме до пристроїв переналаштовуваних лазерів середнього інфрачервоного (ІЧ) діапазону з поздовжнім накачуванням твердотільного активного елементу лазерними діодами. Такі твердотільні лазери можуть бути використані для спектроскопії в середньому ІЧ-діапазоні, для розробки оптичних параметричних генераторів, для створення оптичних стандартів частоти на холодних молекулах і ін.

Рівень техніки

Відомі лазерні джерела випромінювання в середньому ІЧ-діапазоні - лазери з накачуванням активного елементу лазерними діодами, що працюють в безперервному і імпульсному режимах. При цьому частина випромінювання таких лазерних джерел поглинається газовими сумішами, присутніми в атмосфері повітря. Внаслідок цього відбувається помітне зменшення вихідної потужності таких систем, їх коефіцієнта корисної дії і відбувається погіршення спектра вихідного випромінювання, в якому спостерігаються провали, відповідні лініям поглинання газових сумішей.

Відомо безліч пристроїв, призначених для отримання лазерної генерації в середньому ІЧ-діапазоні спектра. Найбільш близьким аналогом (прототипом) пропонованого пристрою можна визнати

переналаштовуваний твердотільний лазер середнього інфрачервоного діапазону з поздовжнім накачуванням діодною лінійкою, описаний в авторській публікації [5], який є твердотілим лазером середнього ІЧ-діапазону з поздовжньою накачуванням і складається з джерела накачування; резонатора, що складається з глухого плоского дзеркала, проміжного сферичного дзеркала, диспергуючого елемента і вихідного плоского дзеркала; і твердотільного активного елемента, встановленого вздовж оптичної осі резонатора; в якості джерела накачування використана лінійка лазерних діодів з можливістю передачі свого випромінювання в резонатор через фокусуючу волоконно-оптичну систему. Як фокусуюча волоконно-оптична система використаний послідовний ланцюг з волоконного світловода, коліматора і фокусуючої лінзи. Резонатор зібраний за трьохзеркальною схемою з глухим плоским дзеркалом, проміжним сферичним дзеркалом і поворотним вихідним плоским дзеркалом. За допомогою поздовжнього накачування лінійкою лазерних діодів на довжині хвилі 1,94 мкм отримана вихідна потужність 280 мВт на центральній довжині хвилі 2,6 мкм з ККД по падаючій потужності 12%. За допомогою резонаторної призми з фториду кальцію, встановленої під кутом Брюстера, отримана перебудова Cr: CdSe лазера в діапазоні від 2,45 до 3,06 мкм довжин хвиль випромінювання з роздільною здатністю 10 нм і вихідною потужністю випромінювання до 50 мВт (див. Графік спектра вихідної потужності випромінювання лазерної системи без продувки на рис. 1.2).

Однак в прототипі через наявність сильних ліній поглинання компонентів атмосферного повітря в діапазоні генерації випромінювання відбувається зменшення вихідної потужності лазерного випромінювання та в спектрі його випромінювання спостерігаються провали, пов'язані з лініями поглинання газів, що знаходяться в атмосферному повітрі.

Розкриття корисної моделі

Технічний результат, на досягнення якого спрямована пропонована корисна модель, полягає в порівняльному збільшенні вихідної потужності лазерного випромінювання, а також створення більш рівномірного плавного спектра вихідної потужності випромінювання.

Зазначений технічний результат досягається тим, що перебудовується твердотільний лазер середнього інфрачервоного діапазону з поздовжньою накачуванням складається з джерела накачування; резонатора, що складається з глухого плоского дзеркала, проміжного сферичного дзеркала, диспергуючого елемента і поворотного вихідного плоского дзеркала; і твердотільного активного елемента, встановленого вздовж оптичної осі резонатора. Як джерело накачування використана лінійка лазерних діодів з можливістю передачі свого випромінювання в резонатор через фокусуючу волоконно-оптичну систему; як фокусуюча волоконно-оптична системи використаний послідовний ланцюг з волоконного світловода, коллиматора і фокусуючої лінзи. При цьому лазерний пристрій поміщено в корпус з можливістю витіснення атмосферного повітря з корпусу за рахунок продувки буферним газом, які не мають поглинання в спектральній області генерації лазера. Буферним газом може бути аргон або азот. Як твердотільного активного елемента резонатора використані кристали халькогенідів, легованих іонами Cr^{2+} , зокрема кристал $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$, або інші сполуки: $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$, $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$, $\text{Cr}^{2+}:\text{Cd}_{0,55}\text{Mn}_{0,45}\text{Te}$, $\text{Cr}^{2+}:\text{CdS}$.

Перелік малюнків

На рис. 1.1 зображена структура взаємозв'язків елементів пристрою пропонованого твердотільного лазера середнього ІЧ-діапазону;

на рис. 1.2. - графіки залежності вихідної потужності лазерного випромінювання від перебудовується довжини хвилі в разі прототипу без продувки і в пропонованому пристрої з продувкою корпусу буферним газом.

Реалізація корисної моделі

На рис. 1 зображені: 1 - джерело накачування у вигляді лінійки лазерних діодів, 2 - колізатор, 3 - фокусуєчий елемент, 4 - глухе плоске дзеркало, 5 - твердотільний активний елемент, 6 - сферичне дзеркало, 7 - диспергуючий елемент, 8 - поворотне вихідне плоске дзеркало, 9 - корпус, 10 - насос для закачування буферного газу в корпус, 11 - отвір для виходу газів з корпусу.

Всі елементи лазерного пристрою розміщені в єдиному загальному корпусі 9, витіснення атмосферного повітря з якого здійснюють за допомогою подачі буферного газу насосом 10, який витісняє атмосферне повітря через вихідний отвір 11.

Запропонований пристрій працює таким чином. випромінювання від джерела накачування 1 - лінійки лазерних діодів, проходячи через волокно, потрапляє в колізатор 2, фокусується на твердотільному активному елементі 5 за допомогою фокусуєчого елемента 3 через глухе плоске дзеркало 4, далі випромінювання генерації відбивається від сферичного дзеркала 6, проходить через диспергуючий елемент 7 і після проходження вихідного дзеркала 8 формує вихідне випромінювання твердотільного лазера. Переналаштування довжини хвилі вихідного лазерного випромінювання здійснюється за допомогою повороту вихідного плоского дзеркала 8. диспергуючий елемент - це узагальнюючий термін, в окремому випадку - це можуть бути призма або дифракційна решітка. Він потрібен для внесення кутової дисперсії (промені різних довжин хвиль випромінювання будуть виходити з нього під різними кутами). Для здійснення генерації хвилі потрібної довжини на виході лазерного пристрою необхідно повернути вихідне дзеркало 8 так, щоб воно стало перпендикулярно напрямку поширення цієї довжини хвилі випромінювання після диспергуючого елемента 7.

Графіки залежностей вихідної потужності лазерного випромінювання від довжини хвилі в разі авторського прототипу без продувки і в пропонованій корисній моделі з продувкою корпусу лазерної системи буферним газом показані на рис. 1.2, причому графік меншої потужності (суцільна лінія) відповідає роботі прототипної системи без продувки, а графік більшої потужності (пунктирна лінія) - з пропонованою продувкою.

В результаті авторських експериментальних досліджень встановлено, що при використанні продувки лазерної системи пристрою в єдиному корпусі за допомогою буферного газу відбувається збільшення вихідної потужності до 2 разів (або в абсолютних значеннях додатково до 50 мВт) в порівнянні з результатами роботи прототипної лазерної системи, і при цьому з спектра вихідної потужності випромінювання практично зникли провали (пунктирна лінія на рис. 1.2), обумовлені лініями поглинання компонентів атмосферного повітря.

Таким чином, пропонований лазерний пристрій може бути використано в якості підсилення джерела лазерного випромінювання з більш рівномірним плавним спектром вихідної потужності випромінювання і з плавним переналаштуванням довжини хвилі випромінювання для задач спектроскопії в середньому ІЧ-діапазоні, розробки оптичних параметричних генераторів, створення оптичних стандартів частоти на холодних молекулах і ін.

Формула корисної моделі

1. Переналаштовувемий твердотільний лазер середнього інфрачервоного діапазону з поздовжнім накачуванням, що складається з джерела накачки; резонатора, що складається з глухого плоского дзеркала, проміжного сферичного дзеркала, диспергуючого елемента і поворотного вихідного плоского дзеркала; і твердотільного активного елемента, встановленого вздовж оптичної осі резонатора; при цьому в

якості джерела накачування використана лінійка лазерних діодів з можливістю передачі свого випромінювання в резонатор через фокусуючу волоконно-оптичну систему; як фокусуюча волоконно-оптична системи використаний послідовний ланцюг з волоконного світловода, коліматора і фокусуючої лінзи, що відрізняється тим, що лазер поміщений в корпус з можливістю витіснення атмосферного повітря з корпусу за рахунок продувки буферним газом, які не мають поглинання в спектральній області генерації лазера.

2. Лазер по п. 1, який відрізняється тим, що буферним газом є аргон або азот.

3. Лазер по п. 1, який відрізняється тим, що в якості твердотільного активного елементу резонатора використані кристали халькогенідів, легованих іонами Cr^{2+} ; зокрема кристал $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ або інші сполуки: $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$, $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$, $\text{Cr}^{2+}:\text{Cd}_{0,55}\text{Mn}_{0,45}\text{Te}$, $\text{Cr}^{2+}:\text{CdS}$.

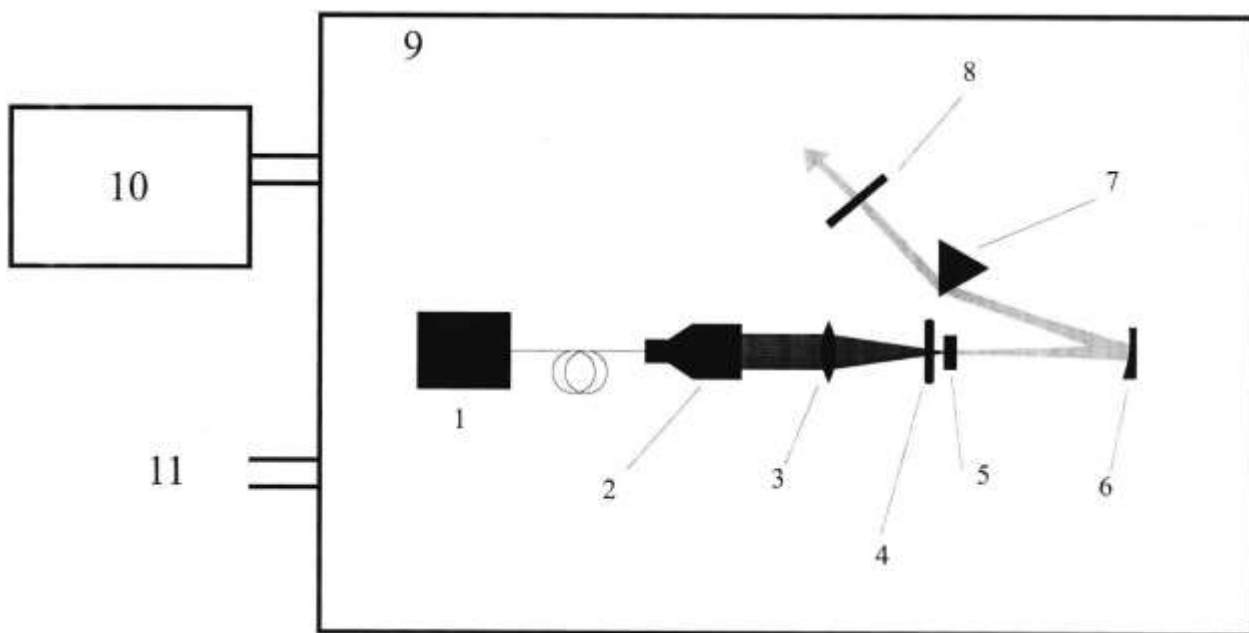


Рис. 1.1. Структура пропонованого твердотільного лазера в середньому ІЧ-діапазоні

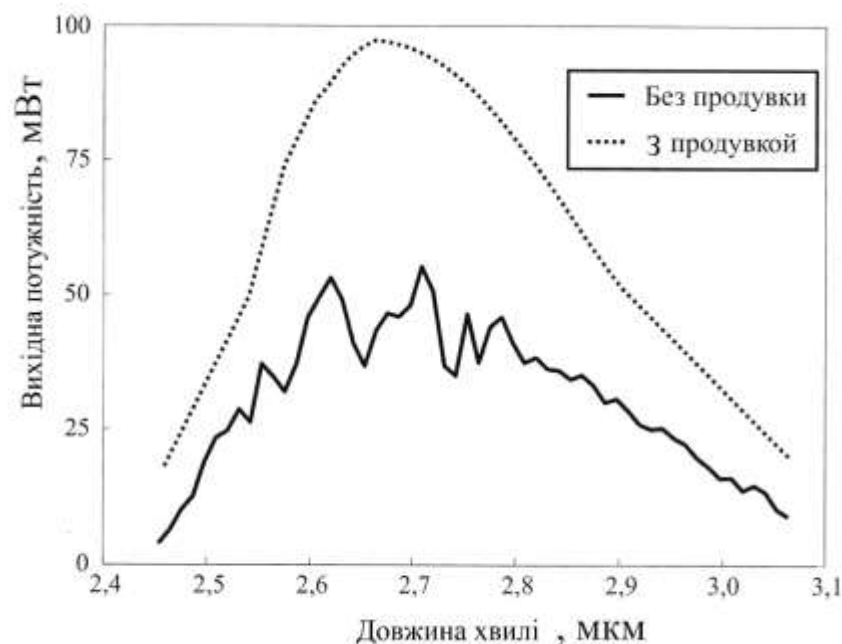


Рис. 1.2. Графіки залежності вихідної потужності лазерного випромінювання від переналаштовуючої довжини хвилі в разі прототипу без продувки і в пропонованому пристрої з продувкою корпусу буферним газом

Патент Російської Федерації №148 558 від 30.06.2014 р. «Твердотельный лазер среднего ИК-диапазона с накачкой диодной линейкой» [6].

Корисна модель відноситься до лазерної техніки, а саме до пристроїв лазерів середнього інфрачервоного (ІЧ) діапазону з накачуванням твердотільного активного елемента лазерними діодами. Такі твердотільні лазери можуть бути використані для спектроскопії в середньому ІЧ-діапазоні, для розробки оптичних параметричних генераторів, для створення оптичних стандартів частоти на холодних молекулах і ін.

Рівень техніки

Відомі лазери з поздовжнім і поперечним накачуванням активного елемента лазерними діодами, що працюють в безперервному і імпульсному режимах. При цьому випромінювання діодів за допомогою різних оптичних систем фокусується на твердотільному активному

елементі. Унаслідок великої розбіжності випромінювання лазерних діодів, відмінності спектрів випромінювання накачування і спектрів поглинання твердотілого активного елемента коефіцієнт корисної дії (ККД) системи накачування виявляється значно нижче потенційно досяжного.

Відомо безліч пристроїв, призначених для отримання лазерної генерації в середньому ІЧ-діапазоні спектра. З них досить близьким за технічною сутністю до запропонованого пристрою можна визнати лазерний пристрій, створений на основі активного середовища з широким спектром випромінювання в середньому ІЧ-діапазоні, який описаний в патенті Китаю № CN 202872171 (МПК H01S 3/16, опубл. 10.04.2013). Лазерний пристрій включає в себе послідовний ланцюг елементів, а саме: джерело накачування, тракт випромінювання накачування, резонатор, утворений твердотілим активним елементом в корпусі між кінцевими муфтами і між переднім вхідним і заднім вихідним дзеркалами і поздовжньо накачуваний джерелом накачування, після резонатора тракт вихідного лазерного випромінювання. В якості активного елемента використовують кристали, леговані двовалентними іонами хрому або кобальту.

У схемі аналога випромінювання джерела накачування потрапляє на твердотілий активний елемент резонатора без фокусування будь-якої оптичною системою, що призводить до недобору потенційно можливого ККД системи накачування і, як наслідок, обмежує досягну величину середньої потужності вихідного випромінювання.

Збільшення ККД лазерного пристрою може забезпечуватися за рахунок використання в якості джерела накачування лінійки лазерних діодів, що володіє максимально можливим ККД в порівнянні з іншими засобами накачування, а також і цілей використання волоконно-оптичної системи, завдяки якій формується якісний колемірований пучок

випромінювання, який потім фокусується на твердотільному активному елементі.

Найбільш близьким аналогом (прототипом) пропонованого пристрою можна визнати лазер, описаний в документі [7], який є твердотілим лазером середнього ІЧ-діапазону з поздовжнім накачуванням і складається з джерела накачування і резонатора, що складається з переднього дзеркала, твердотільного активного елементу, встановленого вздовж оптичної осі резонатора, і заднього сферичного дзеркала. Як джерело накачування використана лінійка лазерних діодів з можливістю передачі свого випромінювання в резонатор через фокусуєчу волоконно-оптичну систему. Як фокусуєча волоконно-оптична система використаний послідовний ланцюг з волоконного світловода, коліматора і фокусуєчої лінзи. Резонатор зібраний по лінійній напівпровідниковій схемі з переднім плоским дзеркалом і заднім сферичним дзеркалом.

Однак в прототипі в якості твердотільного активного елементу використані кристали $\text{NaLa}_{1/2}\text{Gd}_{1/2}(\text{WO}_4)_2$, активовані іонами Tm^{3+} , які формують малий набір довжин хвиль лазерного випромінювання 1908 нм і 1918 нм, що є недостатнім для якісного вирішення задач спектроскопії в середньому ІЧ-діапазоні, розробки оптичних параметричних генераторів, створення оптичних стандартів частоти на холодних молекулах і ін.

Розкриття корисної моделі

Технічний результат, на досягнення якого спрямована пропонована корисна модель, заключається в розширенні формованого твердотілим активним елементом діапазону довжин хвиль лазерного випромінювання.

Зазначений технічний результат досягається тим, що твердотільний лазер середнього інфрачервоного діапазону з поздовжнім накачуванням складається з джерела накачування і резонатора, що складається з переднього дзеркала, твердотільного активного елементу, встановленого

вздовж оптичної осі резонатора, і заднього сферичного дзеркала. Як джерело накачування використана лінійка лазерних діодів з можливістю передачі свого випромінювання в резонатор через фокусуєчу волоконно-оптичну систему. Як фокусуєча волоконно-оптична система використаний послідовний ланцюг з волоконного світловода, коліматора і фокусуєчої лінзи. Резонатор лазерного пристрою переважно зібраний по лінійній напівпровідниковій схемі з переднім плоским дзеркалом і заднім сферичним дзеркалом.

При цьому в якості твердотільного активного елемента резонатора використані кристали халькогенідів, легованих іонами Cr^{2+} або Fe^{3+} . Кристали халькогенідів, легованих іонами Cr^{2+} або Fe^{3+} в якості твердотільного активного елемента, формують значно розширений у порівнянні з прототипом діапазон довжин хвиль лазерного випромінювання від 1800 до 3300 нм.

На рис. 1.3 зображена структура послідовного ланцюга елементів пропонованого твердотільного лазера середнього ІЧ-діапазону.

Реалізація корисної моделі

На рис. 1.3 зображені: 1 - джерело накачування у вигляді лінійки лазерних діодів, 2 - волоконно-оптична система, 3 - вхідне (переднє) плоске дзеркало, 4 - твердотільний активний елемент, 5 - вихідне (заднє) сферичне дзеркало. Всі елементи лазерного пристрою розміщені в єдиному загальному корпусі.

Пропонований пристрій працює таким чином. Випромінювання від джерела накачування 1 - лінійки лазерних діодів, проходячи через волоконно-оптичну систему 2, що складається з волоконного світловода, коліматора і фокусуєчої лінзи, і плоского дзеркала 3, фокусується на твердотільному активному елементі 4, після якого на виході сферичного дзеркала 5 формується вихідне випромінювання твердотільного лазера. У волоконний світловод введено випромінювання лінійки лазерних діодів, а

на виході світловода встановлений коліматор для формування колемірованного пучка випромінювання накачування. Колемірований пучок випромінювання накачування потім за допомогою фокусуєчої лінзи фокусується після переднього (вхідного) плоского дзеркала резонатора на його твердотільному активному елементі, а далі виходить з резонатора через заднє сферичне дзеркало у вигляді вихідного випромінювання.

В результаті авторських експериментальних досліджень встановлено, що кристали халькогенідів, легованих іонами Cr^{2+} або Fe^{3+} в якості твердотільного активного елементу пропонованого лазерного пристрою, формують розширений в порівнянні з прототипом діапазон довжин хвиль лазерного випромінювання від 1800 до 3300 нм.

Таким чином, пропонований лазерний пристрій може бути використано як джерело випромінювання з розширеною перебудовою довжини хвилі випромінювання для реалізації таких завдань дослідно-конструкторської роботи з шифром «Мультисенсор» за завданням Мінпром-торгу Росії, як розробка мультисенсорних кабельних систем безперервного контролю стану підводних трубопроводів, а також більш якісного вирішення завдань спектроскопії в середньому ІЧ-діапазоні, розробки оптичних параметричних генераторів, створення оптичних стандартів частоти на холодних молекулах і ін.

Формула корисної моделі

Твердотільний лазер середнього інфрачервоного діапазону з поздовжнім накачуванням, що складається з джерела накачування і резонатора, що складається з переднього дзеркала, твердотільного активного елементу, встановленого вздовж оптичної осі резонатора, і заднього сферичного дзеркала; при цьому в якості джерела накачування використана лінійка лазерних діодів з можливістю передачі свого випромінювання в резонатор через фокусуєчу волоконно-оптичну

систему; як фокуруюча волоконно-оптична система використаний послідовний ланцюг з волоконного світловода, коліматора і фокууючої лінзи; резонатор зібраний по лінійній напівпровідниковій схемі з переднім плоским дзеркалом і заднім сферичним дзеркалом; відрізняється тим, що в якості твердотільного активного елемента резонатора використані кристали халькогенідів, легованих іонами Cr^{2+} або Fe^{3+} .

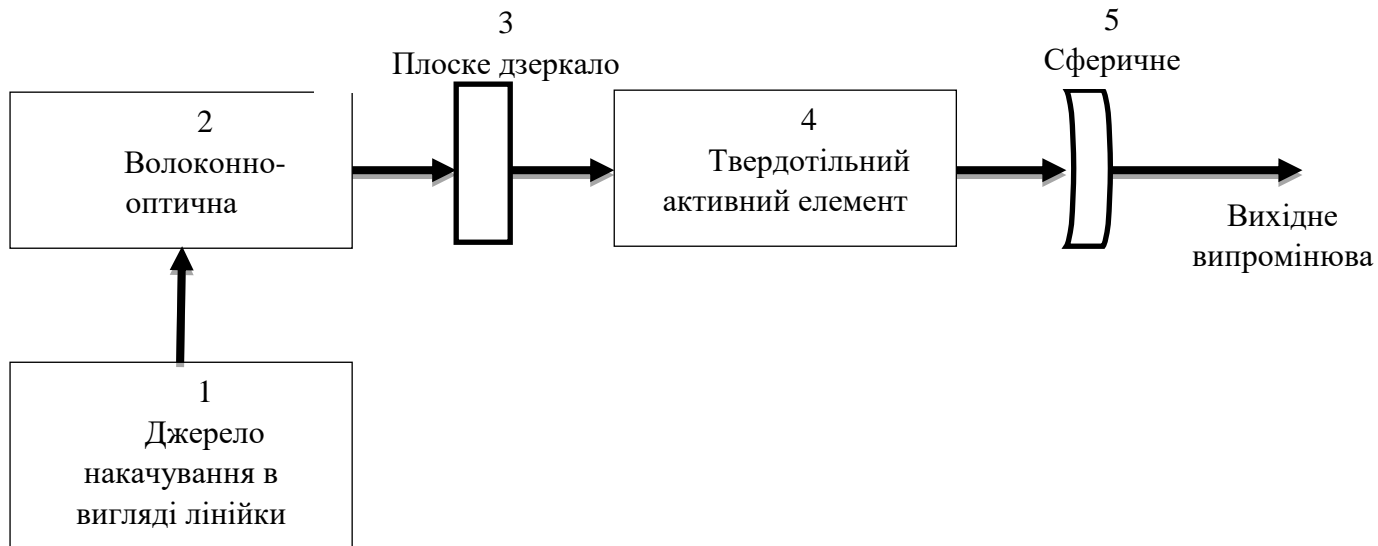


Рис. 1.3 Структура послідовного ланцюга елементів пропонованого твердотільного лазера середнього ІЧ-діапазону

Види і застосування лазерних далекомірів

Перший лазерний далекомір ХМ-23 пройшов випробування, і був прийнятий на озброєння армій. Він розрахований на використання в передових спостережних пунктах сухопутних військ. Джерелом випромінювання в ньому є лазер на рубіні з вихідною потужністю 2.5 Вт і тривалістю імпульсу 30нс. У конструкції далекоміра широко використовуються інтегральні схеми. Випромінювач, приймач і оптичні елементи змонтовані в моноблоці, який має шкали точного звіту азимута і кута місця мети. Живлення далекоміра виробляють батареї нікелево-кадмієвих акумуляторів напругою 24В, що забезпечує 100 вимірювань

дальності без підзарядки.

Цікавий шведський лазерний далекомір. Він призначений для використання в системах управління вогнем бортової корабельної і берегової артилерії. Конструкція далекоміра відрізняється особливою міцністю, що дозволяє застосовувати його в складених умовах. Далекімір можна сполучати при необхідності з підсилювачем зображення або телевізійним візором. Режим роботи далекоміра передбачає або вимірювання через кожні 2с. протягом 20с. і з паузою між серією вимірювань протягом 20с. або через кожні 4с. протягом тривалого часу. Цифрові індикатори дальності працюють таким чином, що коли один з індикаторів видає останню виміряну дальність, і в пам'яті іншого зберігаються чотири попередні вимірювання дистанції.[8]

Дуже вдалим лазерним далекоміром є LP-4. Він має в якості модулятора добротності оптико-механічний затвор. Приймальна частина далекоміра є одночасно візором оператора. Діаметр вхідної оптичної системи складає 70мм. Приймачем служить портативний фотодіод, чутливість якого має максимальне значення на хвилі 1,06 мкм. Лічильник забезпечений схемою стробування по дальності, що діє по установці оператора від 200 до 3000м.

Портативні лазерні далекоміри розроблені для піхотних підрозділів і передових артилерійських спостерігачів. Один з таких далекомірів виконаний у вигляді бінокля. Джерело випромінювання і приймач змонтовані в загальному корпусі, з монокулярним оптичним візором шестиразового збільшення, в полі зору якого є світлове табло з світлодіодів, добре помітних як вночі, так і вдень. У приймальній частині використовується здвоєний лавинний фотодетектор з широкосмуговим малошумливим підсилювачем, що дозволяє детектувати короткі імпульси з малою потужністю, яка становить усього 10 в -9 Вт. Помилкові сигнали, відбиті від сусідніх предметів, що знаходяться в стовбурі з метою,

виключається з допомогою схеми стробування по дальності. Джерелом живлення є малогабаритна акумуляторна батарея, що забезпечує 250 вимірювань без підзарядки. Електронні блоки далекоміра виконані на інтегральних і гібридних схемах, що дозволило довести масу далекоміра разом з джерелом живлення до 2 кг.[8]

Установка лазерних далекомірів на танки відразу зацікавила зарубіжних розробників військового озброєння. Це пояснюється тим, що на танк можна ввести далекомір в систему управління вогнем танка, підвищити його бойові якості. Для цього був розроблений далекомір AN / VVS-1 для танка М60А. Він не відрізнявся за схемою від лазерного артилерійського далекоміра на рубіні, проте крім видачі даних про дальності на цифрове табло в обчислювальній машині системи управління вогнем танка. При цьому вимір дальності може здійснюватися як навідником гармати так і командиром танка. Режим роботи далекоміра - 15 вимірювань в хвилину протягом однієї години.

В арміях, крім артилерії і танків, лазерні далекоміри використовуються в системах, де потрібно в короткий проміжок часу визначити дальність з високою точністю. Так, у пресі повідомлялося про розроблену автоматичну систему супроводу повітряних цілей і вимірювання дальності до них. Система дозволяє проводити точне вимірювання азимута, кута місця і дальності. Дані можуть бути записані на магнітну стрічку і оброблені на ЕОМ. Система має невеликі розміри і масу і розміщується на рухомому фургоні. У систему входить лазер, що працює в інфрачервоному діапазоні. Приймальний пристрій з інфрачервоною телевізійною камерою, телевізійний контрольний пристрій, що стежить дзеркало з сервопроводом, цифровий індикатор і записуючий пристрій. Лазерний пристрій на неодимовому склі працює в режимі модульованої добротності і випромінює енергію на хвилі 1,06 мкм. Потужність випромінювання становить 1 Мвт в імпульсі при

тривалості 25нс і частоті проходження імпульсів 100 Гц. Розбіжність лазерного променя 10 мрад. У каналах супроводу використовуються різні типи фотодетекторів. У приймальному пристрої використовується кремнієвий світлодіод.

Оскільки застосовується кілька типів далекомірів, то намітилася тенденція уніфікації лазерних систем у вигляді окремих модулів. Це спрощує їх складання, а також заміну окремих модулів в процесі експлуатації. За оцінками фахівців, модульна конструкція лазерного далекоміра забезпечує максимум надійності і ремонтпридатності в польових умовах.

Модуль випромінювача складається з стрижня, лампи-накачування, освітлювача, високовольтного трансформатора, дзеркал резонатора. Модулятора добротності. Як джерело випромінювання використовується зазвичай неодимове скло або алюмінієво-натрієвий гранат, що забезпечує роботу далекоміра без системи охолодження. Всі ці елементи головки розміщені в жорсткому циліндричному корпусі. Точна механічна обробка посадкових місць на обох кінцях циліндричного корпусу головки дозволяє виробляти їх швидко заміну і установку без додаткового регулювання, а це забезпечує простоту технічного обслуговування і ремонту. Для початкового юстирування оптичної системи використовується опорне дзеркало, укріплене на ретельно обробленій поверхні головки, перпендикулярно осі циліндричного корпусу. Освітлювач дифузійного типу являє собою два входящих один в інший циліндра між стінками яких знаходиться шар окису магнію. Модулятор добротності розрахований на безперервну стійку роботу або на імпульсну з швидким запусками. основні дані уніфікованої головки такі: довжина хвилі - 1,06 мкм, енергія накачування - 25 Дж, енергія вихідного імпульсу - 0,2 Дж, тривалість імпульсу 25нс, частота проходження імпульсів 0,33 Гц протягом 12с допускається робота з частотою 1 Гц) , кут розходження

2 мрад. Внаслідок високої чутливості до внутрішніх шумів фотодіод, передпідсилювач і джерело живлення розміщуються в одному корпусі з можливо більш щільним компонованням, а в деяких моделях все це виконано у вигляді єдиного компактного вузла. Це забезпечує чутливість порядку $5 \cdot 10^{-8}$ Вт.

В підсилювачі є порогова схема, збуджується в той момент, коли імпульс досягає половини максимальної амплітуди, що сприяє підвищенню точності далекоміра, бо зменшує вплив коливань амплітуди приходящого імпульсу. Сигнали запуску і зупинки генеруються цим же фотоприймачем і йдуть по тому ж тракту, що виключає систематичні помилки визначення дальності. Оптична система складається з афокального телескопа для зменшення розходження лазерного променя і фокусуємого об'єктива для фотоприймача. Фотодіоди мають діаметр активної площадки 50, 100, і 200 мкм. Значному зменшенню габаритів сприяє те, що прийомна й передавальна оптичні системи суміщені, причому центральна частина використовується для формування випромінювання передавача, а периферійна частина - для прийому відбитого від цілі сигналу.

1.2 Приклади технічної реалізації сучасних далекомірів

Сучасні лазерні імпульсні далекоміри виробляються такими великими закордонними комерційними компаніями, як Bosch, Leica, Zeiss, а також вітчизняними підприємствами: НДІ «Полюс», ВАТ «Красногорський завод ім. С.А. Зверєва» і ін. Всі вони мають відмінні ергономічні і малогабаритні характеристики, мають широку функціональність (цифрова індикація дальності, режимів роботи, наявності об'єктів в стропа і поза ним, розряду батарей, інтерфейсу зв'язку з персональним комп'ютером, вимірювання швидкості об'єкта) і в основному розрізняються по дальності дії і точності вимірювання в залежності від передбачуваного

використання. Основні характеристики деяких вітчизняних і зарубіжних лазерних імпульсних далекомірів наведені в табл. 1.

За даними табл. 1 можна зробити висновок про те, що до особливостей випускаючихся імпульсних далекомірів можна віднести великі граничні вимірювані дальності (до 30 км), похибка 0,5 м. При цьому на дальностях до декількох кілометрів в якості випромінювача використовується ППЛ, а на великих відстанях - твердотільний лазер.

Таблиця 1.1

Параметри деяких сучасних імпульсних лазерних далекомірів

Модель	Изготовитель	Диапазон измеряемой дальности, м	Погрешность измерения, м	Длина волны излучения, мкм
1Д26	ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева»	110...29 995	10,0	1,060
EG-LRF	НИИ «Полюс»	50...25 000	5,0	1,540
КТД-2-2	НИИ «Полюс»	100...20 000	0,5	1,079
Victory RF 10x56 T*	Carl Zeiss	10...1 200	1,0	0,904

Як приклад сучасних лазерних фазових далекомірів можна привести лазерні фазові далекоміри фірм Leica і Bosch. У табл.2 наведені основні параметри далекомірів, які випускаються цими фірмами.

Таблиця 1.2

Параметри далекомірів фірм Leica і Bosch

Фирма-производитель	Модель	Погрешность измерения, мм	Дальность измерения*, м	Габариты прибора, мм	Масса прибора, г
Leica	D3a	±1	0,05...80	125×45×24	110
	D8	±1	0,05...200	143×55×30	195
	A8	±1,5	0,05...200	148×64×36	270
	DXT	±1,5	0,05...70	—	—
Bosch	DLE 70	±1,5	0,05...70	100×59×32	180
	DLE 40	±1,5	0,05...40	100×58×32	180

* Дальность измерения по диффузным объектам.

На рис.1.4 показаний зовнішній вигляд далекомірів, представлених в табл.1 Практично всі прилади (крім стаціонарних далекомірів військового призначення) мають конструктивне оформлення у вигляді бінокля. При цьому всі прилади оснащені зорової телескопічною системою для зручності наведення на віддалені об'єкти. Індикація дальності зазвичай представляється в цифровій формі на екрані, оптично зв'язаному з одним з окулярів зорової системи.



Рис.1.4 Зовнішній вигляд імпульсних далекомірів



Рис.1.5 Зовнішній вигляд фазового далекоміра Leica Disto A5

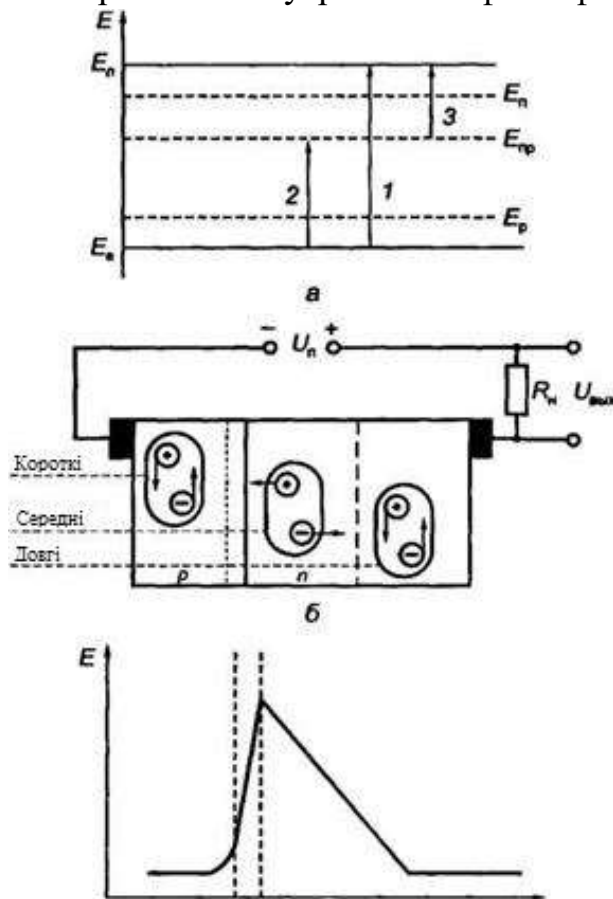
Відзначити, що при застосуванні уголкового відбивача зазначена в табл.2 гранична дальність вимірювання зростає в 2-2,5 рази. Всі представлені далекоміри мають малі габарити і похибка вимірювання на рівні ± 1 мм.

На рис.1.5 показаний зовнішній вигляд лазерного фазового далекоміра Leica Disto A5. Особливістю даної моделі є наявність обчислювача, що дозволяє вимірювати периметр, площа і об'єм на підставі інформації про дальності. Як правило, в побутових фазових далекомірах використовується ППЛ видимого діапазону (Найчастіше 0,6..0,68 мкм) для полегшення процесу наведення. Крім того, в прилад вбудований телескопічний візир, що дозволяє здійснювати наведення на зондіруемой об'єкт в умовах великої освітленості.

1.3 Фотоприймачі та фотоприймальні пристрої

Фотоприймальні прилади (ФПП) використовуються в декількох вузлах лазерних систем танкових прицілів. В першу чергу, це фотоприймальні пристрої (ФПП) і формувачі імпульсу «Старт» лазерних далекомірів, вузли контролю наявності та вимірювання параметрів лазерного випромінювання в далекомірах і лазерних каналах управління, а також приймачі в бортових фотоприймальних пристроях. Крім того, ФПП досить широко застосовуються також в обладнанні для налагодження і юстирування прицілів з лазерними системами.

Робота фотоприйомних приладів (фотоприймачів) заснована на використанні внутрішнього фотоефекту в твердих тілах (рис. 1.6).



В напівпровідниках, що є твердими кристалічними матеріалами, є групи безперервно розташованих (злилися) енергетичних рівнів - зони: верхня група рівнів - зона провідності і більш низька група зайнятих рівнів - валентна зона, які розділені смугою заборонених енергій - забороненою зоною. У реальному кристалі число носіїв струму (електронів і дірок) визначається в основному наявністю домішок. Існують два сорти домішок: одні з

них мають рівні

Рис. 1.6 Принцип дії фотоприймального приладу:

a - енергетична діаграма; *б* - процеси р-п-переході;

ν - розподіл електричного поля в структурі;

$E_{пр}$ - енергія домішкового рівня: 1 – перехід «зона-зона»; 2 - перехід «валентна зона - домішковий рівень»;

3 - перехід «домішковий рівень - зона провідності» енергії, розташовані поблизу зони провідності та іонізуючись, створюють надлишкові електрони. Вони отримали назву донорних домішок, а відповідний матеріал називають напівпровідником n-типу. Інші домішки, маючи рівні поблизу валентної зони, здатні захоплювати електрони з валентної зони, створюючи в ній надмірну кількість дірок. Ці домішки отримали назву акцепторів, а матеріал - напівпровідником p-типу.

Поглинаємі напівпровідником кванти звільняють носії заряду або з валентної зони, або із зони домішок з переходами 1, 2 або 3 відповідно (рис. 1.6). Оскільки для кожного з цих переходів потрібна деяка мінімальна енергія, характерна для даного матеріалу, кожен тип фотоприймача має певну довгохвильову границю $\lambda_{гр}$, яка визначається формулою

$$\lambda_{гр} = \frac{1,24}{E_2 - E_1} \quad (1.2)$$

де різниця $E_2 - E_1$ енергетичний зазор при переході «зона-зона» або «домішковий рівень - зона» (на рис.1 E_2 відповідає E_n , а $E_1 - E_v$ або E_{np}

Довжина хвилі $\lambda_{гр}$ в (1) виражається в мкм; E_2 і E_1 - в електрон-вольтах (eV).

Розглянемо принцип дії фотоприймального приладу на основі $p-n$ - переходу (рис.1.6). При поглинанні фотона в напівпровіднику утворюються пари електрон-дірка. При їх поділі виникає фотострум, причому електрони переміщуються в n -області, а дірки - в p - області.

Імовірність поділу створеної фотоном пари електрон - дірка вище в тому випадку, якщо ця пара утворюється в області напівпровідника, що

знаходиться під впливом електричного поля. Електричне поле розподіляється в кристалі напівпровідникового приладу нерівномірно. У дифузійних областях p - і n - типу поле набагато слабкіше, ніж в області між ними, відомої під назвою «збідненого шару». Для ефективної роботи фотоприймача необхідно, щоб найбільше число фотонів поглиналося збідненим шаром, тобто фотони не повинні поглинатися, поки не вийшли за межі збідненого шару.

Глибина проникнення фотона в напівпровідник до поглинання залежить від його довжини хвилі. Фотони з малою довжиною хвилі поглинаються поблизу поверхні, а фотони з великою довжиною хвилі можуть проникати через всю товщу кристала. Тому, для забезпечення широкої спектральної характеристики, необхідно, щоб кристал фотодіода мав дуже тонкий p - шар, що допускає проникнення фотонів з малою довжиною хвилі, і товстий збіднений шар для отримання максимального фотоструму від довгохвильових фотонів.

Товщина збідненого шару залежить від питомого опору напівпровідника в цій області і від зворотного зсуву. Збіднений шар існує і в тому випадку, коли зворотне зсув не діє. Це обумовлено наявністю «вбудованого поля», яке утворюється внаслідок дифузії через перехід неосновних носіїв. Напряга зворотного зсуву розширює збіднену область.

Розміри збідненого шару при будь-якій напрузі більше в тих приладах, у яких поблизу p - n - переходу матеріал має більш високий питомий опір. У той же час на обох протилежних поверхнях кристалу для виготовлення омичних контактів потрібен низький питомий опір.

Фотоприймачі з p - n - переходом виготовляють методом дифузії домішок p - типу в матеріал n -типу з низьким питомим опором. Мала товщина дифузного p -шару забезпечує високу чутливість фотонам з малою довжиною хвилі. Щоб розширити збіднену область для створення

високої чутливості до фотонів з великою довжиною хвилі, потрібно відносно високий зворотний зсув.

Глибока дифузія домішок p -типу погіршує чутливість; до випромінювання з малою довжиною хвилі, але завдяки створенню «плавного» переходу дає можливість зменшити напругу зсуву, що необхідно для забезпечення високої чутливості до випромінювання з великою довжиною хвилі.

Для підвищення чутливості до фотонів з малою і великою довжиною хвиль при низькому зворотному зміщенні між p - і n - область створюють шар з високим питомим опором, що отримав назву i -шар. Фотоприймачі, що мають i -шар, отримали назву $p-i-n$ структур. Такий прилад має тонку дифузійну p - область (на яку падає потік випромінювання) і більш товсту дифузійну n -область з іншого боку високоомної кремнієвої пластини. У фотоприймачах з $p-i-n$ - структурою i -шар має таке високий питомий опір, що навіть при нульовому зміщенні збіднений шар поширюється від p - шару приблизно на половину глибини i -шару.

При зворотному зсуві до 5 В збіднення поширюється аж до n -шару і спостерігається ефект «змикання». Оскільки пробивна напруга перевищує 200 В, часто бажано встановлювати режим роботи при зворотних напругах, що перевищують напругу змикання, щоб підтримувати повне збіднення i - шару навіть при високих рівнях потоку випромінювання. Це забезпечує найкращу лінійність і швидкодія.

Якість фотоприймача може бути оцінена його квантовою ефективністю η , яка визначається як кількість генеруємих електронів на один поглинений фотон. В ідеальному випадку кожен фотон повинен генерувати один електрон фотоструму.

1.4 Основні параметри фотоприймачів

Найважливішим параметром фотоприймача є чутливість [35]. Цей

параметр можна до певної міри вважати аналогічним коефіцієнту посилення в приладах з електронною провідністю. У загальному випадку чутливість фотоприймача відображає зміну електричного стану на виході фотоприймача при подачі на його вхід одиничного оптичного сигналу.

Оптичне випромінювання може характеризуватися енергетичними й світловими параметрами. Відповідно до характеризуемого параметра розрізняють чутливість фотоприймача до потоку випромінювання S_{Φ} , світловому потоку $S_{\Phi\nu}$, опромінення S_{Ee} і до освітленості S_{Ev} .

Залежно від вимірюваного електричного параметра на виході фотоприймача розрізняють струмову і вольтову чутливості фотоприймача.

Якщо вимірюваною величиною є фотострум, то приймач характеризують струмовою чутливістю S_I . Чутливості фотоприймача, у якого вимірюваною величиною є напруга фотосигналу, називають вольтовою чутливістю S_v .

На практиці часто використовують в якості основного робочого параметра фоточутливість S_{Φ} , вимірювану в А/Вт,

$$S_{\Phi} = \frac{\eta * \lambda}{1.24} = \frac{I_{\Phi}}{\Phi_E} \quad (1.3)$$

де λ - довжина хвилі фотона, мкм; η - квантова ефективність; I_{Φ} - фотострум, А; Φ_E - потік випромінювання, Вт.

Приклади визначення чутливості фотоприймача наведені в таких виразах:

$$S_{I\Phi\nu} = \frac{I_{\Phi}}{\Phi_{\nu}}; S_{IE\nu} = \frac{I_{\Phi}}{E_{\nu}}; S_{V\Phi\nu} = \frac{U_{\Phi}}{\Phi_{\nu}}; S_{VE\nu} = \frac{U_{\Phi}}{E_{\nu}},$$

(1.4)

$S_{I\Phi\nu}$ - струмова чутливість до потоку випромінювання;

$S_{IE\nu}$ - струмовий чутливість до освітленості;

$S_{V_{fv}}$ вольта чутливість до потоку випромінювання;

$S_{V_{Ev}}$ - вольта чутливість до опромінення.

Чутливість фотоприймача не є постійна величина. Вона залежить, зокрема, від параметрів випромінювання. Для підрахунку цієї залежності вводять поняття статичної та динамічної диференціальної чутливості фотоприймача, при цьому статична чутливість визначається відношенням постійних значень вимірюваних величин.

Чутливість залежить від довжини хвилі падаючого випромінювання. Тому розрізняють інтегральну чутливість фотоприймача до немонохроматичного випромінювання заданого спектрального складу і монохроматичну чутливість фотоприймача до монохроматичного випромінювання.

1.5 Шумові і порогові параметри фотоприймачів

Крім корисного сигналу на виході фотоприймача завжди має місце хаотичний сигнал з випадковою амплітудою і спектром - це шум фотоприймача. Джерела шуму можуть бути по відношенню до фотоприймача як внутрішніми, так і зовнішніми. Шум не дозволяє реєструвати малі значення вхідного випромінювання, так як воно стає невиразним на тлі шуму.

В оптимально сконструйованому фотоприймачі чутливість до малих вхідних сигналів визначається тільки рівнем власних шумів приладу. Шуми визначаються випадковими (флуктуаційними) процесами, а рівень шумів характеризують імовірнісними параметрами: математичним очікуванням (середнім рівнем шуму), середньоквадратичним значенням або дисперсією. Розподіл потужності шуму по спектру часто задається спектральної щільністю шуму - шумом в одиничної смугі частот.

У фотоприймачах, поряд зі звичайними для напівпровідників видами шумів (тепловим, дробовим і ін.), додається також радіаційний.

Зазвичай шум фотоприймача кількісно характеризують струмом шуму

або напругою шуму. Під струмом шуму $I_{ш}$ розуміють середньоквадратичне значення флуктуації струму, що протікає через фотоприймач у зазначеній смузі частот. Напруга шуму - це середньоквадратичне значення флуктуації напруги на заданому опорі навантаження в ланцюзі фотоприймача.

Зв'язок чутливості фотоприймача з шумами кількісно визначають пороговим потоком фотоприймача $\Phi_{п}$, рівним середньоквадратичному значенню діючого на фотоприймач потоку випромінювання, при якому середньоквадратичне значення фотоструму рівно середньоквадратичного значення струму шуму. Таким чином, якщо потік випромінювання дорівнює пороговому потоку $\Phi_{пор}$, то значення струму шуму і фотоструму порівнюються, тобто $I_{ш} = I_{ф}$ при $\Phi = \Phi_{пор}$.

Так як шум залежить від смуги частот, в якій він вимірюється, то значення $\Phi_{пор}$ залежить від частоти. Тому найчастіше визначають поріг фотоприймача в одиничній смузі частот ($\Phi_{пор1}$), як мінімальне середньоквадратичне значення синусоїдально модульованого потоку з заданим спектром, взяте по відношенню до смуги пропускання частот.

Рівень шумів фотоприймача залежить від площі фоточутливого елемента. Для характеристики цієї залежності введений параметр $\Phi'_{пор1}$ - питомий пороговий потік фотоприймача:

$$\Phi'_{пор1} = \frac{\Phi_{пор1}}{S}, \quad (1.5)$$

де $\Phi_{пор1}$ - потік в одиничній смузі частот;

S - площа фоточутливого елемента фотоприймача.

Таким чином, питомий пороговий потік - це потік фотоприймача в одиничній смузі частот, віднесений до одиничного по площі фоточутливого елемента.

1.6 Характеристики фотоприймачів

Основними характеристиками фотоприймачів є вольтамперна, спектральна і енергетична характеристики.

Вольтамперна характеристика (ВАХ) - залежність напруги на виході фотоприймача від вихідного струму (фотоструму) при заданому потоці випромінювання.

Енергетична характеристика виражає залежність фотоструму від потоку випромінювання, падаючого на фотоприймач.

Енергетична характеристика описується, як правило функцією вигляду:

$$I_{\Phi} = \Phi^n. \quad (1.6)$$

Показник ступеня n характеризує лінійність енергетичної характеристики. При $n \approx 1$ характеристика лінійна; область значень Φ (від Φ_{min} до Φ_{max}), в якій ця умова виконується, визначає динамічний діапазон $\Delta\Phi$ лінійності фотоприймача. Динамічний діапазон виражається в децибелах:

$$\Delta\Phi = 10 \lg \frac{\Phi_{max}}{\Phi_{min}}. \quad (1.7)$$

Спектральна характеристика - залежність чутливості фотоприймача від довжини хвилі падаючого на фотоприймач монохроматичного випромінювання.

Довгохвильовий кордон спектра $\lambda_{гр}$ визначає максимальну довжину хвилі падаючого на фотоприймач випромінювання; короткохвильова межа $\lambda_{кр}$ обумовлена зростанням поглинання випромінювання в пасивних областях структури при зменшенні довжини хвилі.

Спектральні характеристики фотоприймачів визначаються властивостями і структурою матеріалів, які використовуються для виготовлення ФПП. Так, в даний час в далекомірах з робочою довжиною

хвилі 1,06 мкм застосовують фотоприймальні пристрої на основі кремнієвих або германієвих лавинних або р-і-п - фотодіодів. У далекомірах, що працюють в діапазоні 1,5-1,75 мкм, використовують германієві лавинні або р-і-п - фотодіоди, а також приймачі на основі фоточутливого з'єднання для інфрачервоної області кадмій-ртуть-телур (Cd-Hg-Te, КРТ). В діапазоні 2-2,5 мкм використовують приймачі на основі твердих розчинів елементів групи A^3B^5 або КРТ. У ФПП, які працюють в діапазоні 10,6 мкм застосовують приймачі на основі КРТ.

Спектральні характеристики ФПП можуть бути в деяких межах оптимізовані за рахунок складу і структури матеріалів, що забезпечується технологічними процесами виготовлення: максимум чутливості може бути зміщений в залежності від робочої довжини хвилі випромінювача.

Відзначимо, що в даний час серійно випускаються ФПП на основі германію або кремнію для ближнього інфрачервоного діапазону (0,8...1,6 мкм).

Виготовлення спеціальних фотоприймачів для середньо інфрачервоного діапазону (2...12 мкм) на основі КРТ представляє собою досить складне завдання. Серійне виготовлення таких ФПП на вітчизняних підприємствах не освоєно, інформація про закордонні ФПП практично також відсутня.

1.7 Визначення порогових потоків, які реєструються фотоприймальними пристроями лазерного далекоміра

Визначення порогових потоків являється одним із найважливіших та складних етапів оцінки енергетичних параметрів лазерних далекомірів.

Величина мінімальної зареєстрованої фотоприймальним пристроєм (ФПП) енергії випромінювання $E_{\text{рейстр}}$ визначається рівнем шуму ФПП, який зручно схарактеризувати величиною еквівалентної потужності шуму $P_{\text{ше}}$ на вході фотоприймача.

Шуми фотоприймача в режимі прямого детектування обумовлені

дробовим ефектом, викликаним дискретною природою струму і випадковими параметрами виникнення фотоелектронів.

Під еквівалентною потужністю шуму розуміють середньоквадратичне значення потужності флуктуацій світлового потоку, що потрапляє на ФПП, при якому в фотоприймачі за відсутності власних шумів виникали би флуктуації струму, відповідні флуктуаціям що спостерігаються, зумовленим власним шумом. Еквівалентна потужність шуму $P_{ше}$ є умовним поняттям, які відображають справжню природу шуму, але є зручною для проведення оцінок.

Часто рівень власного шуму фотоприймача визначається в технічній документації на фотоприймач величиною питомого порога чутливості Φ_n , яка вимірюється в $Вт * см^{-1} * Гц^{-1/2}$; являє собою питому спектральну щільність еквівалентної потужності власного шуму фотоприймача (еквівалентну потужність власного шуму, віднесена до чутливого майданчику з площею $1 см^2$ і до смуги пропускання $1 Гц$). Іноді задають зворотню величину - Питому здатність виявлення D (Detectivity), яка вимірюється в $Вт^{-1} * см * Гц^{1/2}$.

Ці параметри можуть наводитися для довжини хвилі, відповідної максимуму спектральної чутливості фотоприймача, або для конкретної довжини хвилі лазерного випромінювання.

Якщо відома величина питомого порога чутливості для певної довжини хвилі $\Phi_{n\lambda}$, то по кривій відносної спектральної чутливості визначають значення $\Phi_{n\lambda\delta}$ для робочої довжини хвилі лазерного далекоміра, а потім її множать на величину $(A * \Delta F)^{1/2}$ де A -площа чутливої площадки фотоприймача і ΔF - ширина смуги пропускання ФПП ($\Delta F = 1/\Delta t_i$) - Отримана величина дорівнює значенню $P_{ше}$ фотоприймача в умовах його застосування в ФПП.

Якщо відомо значення F_n порогової чутливості фотоприймача

$[Вт * Гц^{-1/2}]$, віднесене до реального чутливого майданчику, то для визначення $P_{ше}$ фотоприймача досить помножити F_n тільки на $(\Delta F)^{1/2}$.

Величина $E_{рейстр}$ пов'язана з $P_{ше}$ співвідношенням:

$$E_{рейстр} = \frac{U_c}{U_{ш}} * P_{ше} * \Delta t_i \quad (1.8)$$

де Δt_i - тривалість реєстрованого імпульсу на виході електронного тракту посилення ФПП (перед граничним пристроєм);

$\frac{U_c}{U_{ш}}$ - відношення корисного сигналу до шуму, встановлюється граничним пристроєм таким чином, щоб ймовірність реєстрації імпульсного сигналу з енергією $E_{рейстр}$ була досить високою, а ймовірність реєстрації випадкового шумового викиду замість сигналу була досить малою.

Для забезпечення вірогідності достовірного прийому сигналу, що дорівнює 0,999, при можливості реєстрації шумового викиду, що дорівнює 10^{-7} , відношення сигналу до шуму має становити приблизно 5,3. На практиці це відношення зазвичай встановлюють в межах 7 ... 10, щоб виключити вплив можливої нестабільності параметрів шуму і порогового пристрою в процесі експлуатації приладу.

Якщо питомий поріг чутливості або питома визначальна здатність не задані, то еквівалентну потужність шуму $P_{ше}$ можна оцінити, виходячи з таких міркувань.

Основними джерелами шуму в ФПП лазерних далекомірів при прямому детектуванні є:

- темновий (власний) шум ФПП, що характеризується еквівалентної потужністю шуму $P_{шт}$;

- шум, викликаний засвіченням фону з еквівалентної потужністю $P_{шт}$;

- шум, викликаний засвіченням зворотним розсіюванням (випромінюванням, створеним лазерним пучком в результаті розсіювання в атмосфері в напрямку на лазерний далекомір) з еквівалентною потужністю $P_{шзр}$.

Результуюча величина еквівалентної потужності шуму ФПП під дією всіх зазначених джерел шуму, визначиться виразом:

$$P_{ш} = P_{шт}^2 * P_{шф}^2 * P_{шзр}^2 \quad (1.9)$$

У загальному випадку дробовий шум фотоструму i , що виникає в фотоприймачі (струм фотокатода в разі фотоелектронного помножувача ФЕП або струм напівпровідникового фотодіода без урахування внутрішнього посилення), супроводжується флуктуаціями, величина яких характеризується середнім квадратом шумового струму, пов'язаним з величиною i формулою Шотткі:

$$I_{ш}^2 = 2ei\Delta F = 2ei \frac{1}{\Delta t_i} \quad (1.10)$$

де e - заряд електрона ($e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ А*с);

ΔF - смуга пропускання електронного тракту, пов'язана з тривалістю реєстрованого імпульсу Δt_i співвідношенням:

$$\Delta F \simeq (\Delta t_i)^{-1} \quad (1.11)$$

Еквівалентна потужність шуму на вході фотоприймача, обумовлена струмом i , становить:

$$P_{ше} = \frac{\sqrt{I_{ш}^2}}{S_{\lambda}} \quad (1.12)$$

де - S_{λ} абсолютна чутливість фотоприймача без урахування внутрішнього посилення в А / Вт на довжині хвилі випромінювання лазера λ .

Формула (5) застосовується для визначення еквівалентної потужності шуму кожного джерела ($P_{шт}, P_{шф}, P_{шзр}$), але може

використовуватися і при спільному впливі джерел шуму, що викликають струм i , який дорівнює сумі струмів, створених різними джерелами.

Власний шум ФПП обумовлений темновим струмом i_T фотоприймача, викликаним спонтанним виникненням носіїв струму (фотоелектронів) при відсутності засвітки. Величина темного струму зазвичай вказується в технічній документації на фотоприймач.

Якщо вказана величина темного струму на виході фотоприймача, що має внутрішнє посилення, то для визначення струму i_T слід розділити цю величину на величину внутрішнього посилення.

У разі засвічення фотоприймача безперервним випромінюванням з довжиною хвилі λ і потужністю P_3 в фотоприймачі виникає постійний струм i , величина якого становить

$$i = P_3 * S_\lambda \quad (1.13)$$

де S_λ - монохроматична чутливість фотоприймача для випромінювання з довжиною хвилі λ .

У довідковій літературі часто приводять не величина S_λ , а значення інтегральної чутливості фотоприймача S_i в А/лм. В цьому випадку абсолютна чутливість в А/Вт на потрібній довжині хвилі може бути визначена з використанням механічного еквівалента світла, зворотна величина якого становить $A_M = 683$ лм/Вт, при наявності характеристики спектральної чутливості фотоприймача, яка наводиться або в нормативній документації на ФПП, або в довідниках.

Зворотня величина механічного еквівалента світла визначає потужність монохроматичного потоку на довжині хвилі, що відповідає максимуму кривої видимості ока (0,555 мкм), еквівалентного по впливу світлового потоку в 1 лм. Знаючи величину інтегральної чутливості фотоприймача в А/лм легко обчислити абсолютну чутливість $S_{0,555}$ на довжині хвилі 0,555 мкм ($S_{0,555} = S_i A_M$, а потім по кривій відносної

спектральної чутливості фотоприймача визначити його абсолютну чутливість на що цікавить довжині хвилі.

При засвіченні фоновим випромінюванням потужність засвічення фотоприймача $P_s = P_\phi$ визначиться виразом:

$$P_\phi = \frac{\pi^2}{16} D^2 \theta^2 B_\lambda \Delta\lambda \tau_2 \exp(-\alpha_\lambda L_\phi) \quad (1.14)$$

де B_λ -спектральна щільність енергетичної яскравості фону на довжині хвилі лазерного далекоміра;

θ - лінійний кут поля зору приймальної системи;

$\Delta\lambda$ -ширина спектра випромінювання, що пропускається приймальною оптичною системою далекоміра з врахування спектрального фільтра і спектральної залежності чутливості фотоприймача;

τ_2 - коефіцієнт пропускання приймального каналу далекоміра;

α_λ - показник поглинання атмосфери на робочій довжині хвилі далекоміра;

L_ϕ - відстань до об'єктів, розсіювання яких створює фонове засвічення.

З формули (7) випливає, що для зменшення шумів від фонових засвічень слід в максимально можливій мірі зменшувати величини кута поля зору приймальної системи і ширину спектра випромінювання, що пропускається приймальною оптичною системою далекоміра. Це сприяє і підвищенню перешкодозахищеності приймальної системи далекоміра від впливу зовнішніх засвічень сторонніми джерелами випромінювання (Сонце, осередки полум'я від пожеж і т.п.).

Значення B_λ визначають за даними, наявними в довідковій технічній літературі, і проводять перевірку впливу фону на макетах і дослідних зразках далекоміра.

Для проведення оцінок доцільно вибирати варіанти найбільш яскравих можливих фонів. При роботі в наземних умовах один з найбільш

яскравих фонів створюється освітленим сонцем снігом.

У ході реалізації заходів по спектральній селекції в оптичній приймальній системі далекоміра (наприклад, зменшення $\Delta\lambda$ шляхом введення в систему спеціального вузькосмугового фільтра) і оптимізації поля зору оптичної системи шуми від засвічення фоном нехтувально малі в порівнянні з власними шумами ФПП.

Потужність засвічення фотоприймача випромінюванням зворотного розсіювання визначається формулою:

$$P_{зр} \simeq 0,4 E_{пер} \tau_1 \tau_2 \frac{d_2^2}{L^2} c \beta \exp(-\alpha_\lambda L) \quad (1.15)$$

де, $E_{пер}$ - енергія випромінювання лазера далекоміра;

$\tau_1 \tau_2$ - коефіцієнти пропускання передавального і приймального каналу далекоміра;

d_2 - діаметр вхідної зіниці приймального каналу далекоміра;

L - дальність, з якої реєструється випромінювання зворотного розсіювання;

c - швидкість світла (для повітря $c \simeq 3 * 10^8$ м / с);

β - коефіцієнт об'ємного зворотного розсіювання в м^{-1} ;

α_λ - показник поглинання атмосфери на робочій довжині хвилі далекоміра.

Величина β пов'язана з коефіцієнтом втрат на розсіювання в атмосфері.

Для молекулярного розсіювання $\beta = 0,12\alpha_m$, в разі аерозольного розсіювання $\beta(0,02 \dots 0,04) \alpha_p$, де α_m , α_p - втрати на молекулярне і аерозольне розсіювання відповідно. З огляду на, те що $\alpha_m \ll \alpha_p$, при проведенні розрахункових оцінок слід користуватися значенням $\beta \simeq 0,04\alpha_p$.

Слід зазначити, що коефіцієнт β в загальному випадку має розмірність множення зворотної довжини і зворотного стерadianу, але у

формулі (8) це враховано, і формально можна вважати, що β має розмірність зворотної довжини.

Засвітка зворотним розсіюванням ϵ , на відміну від фонові засвітки, явище, вплив якого не може бути усунуто шляхом удосконалення конструкції лазерного далекоміра. Найбільш сильна засвітка зворотним розсіюванням має місце при малих дальностях. Відповідно імпульс випромінювання засвічення приходить на ФПП набагато раніше, ніж випромінювання, розсіяне цілею. Тому вплив засвічення зворотним розсіюванням може бути зменшено, наприклад, встановленням мінімального часу затримки в електронних системах, після якого починається обробка сигналів. Однак це не обмежує вплив засвічення зворотним розсіюванням від ділянок, які перебувають на робочих дальностях, а тому в значній мірі впливає на величину мінімальної вимірюваної дальності до мети.

При роздільних приймальної і передавальної оптичних системах далекоміра максимум засвічення зворотним розсіюванням спостерігається з мінімальної дальності; на якій значна частина пучка випромінювання виявляється в поле зору приймальної оптичної системи. На дуже малих відстанях через паралакса в поле зору приймальної системи потрапляє мала частина пучка випромінювання (при $L=0$ пучок випромінювання знаходиться повністю поза увагою приймальної системи).

У разі, коли вихідний діаметр передавальної оптичної системи, що визначає діаметр пучка на виході з далекоміра, становить $d_{\text{пер}}$, відстань між ближніми краями зіниць приймальної і передавальної оптичних систем дорівнює Δl і оптичні осі приймальної і передавальної систем паралельні, мінімальна дальність $L_{\text{мін}}$ при якій пучок випромінювання практично повністю потрапляє в поле зору приймальної оптичної системи, може бути оцінена за формулою:

$$L_{\text{мін}} = \frac{d_{\text{пер}} + \Delta l}{\theta - \gamma_{0,65}} \quad (1.16)$$

де θ - лінійний кут поля зору приймальні системи, рад;
 $\gamma_{0,65}$ розходження випромінювання далекоміра, рад.

При проведенні оцінок доцільно проводити розрахунок потужності зворотного розсіювання не тільки для дальності $L_{\text{макс}}$, але і для дальності $L_{\text{мін}}$, де зворотне розсіювання найзначніше впливає на ФПП. Величина $L_{\text{мін}}$ для далекомірів з типовими параметрами становить приблизно 150-300 м.

На вході порогового пристрою ФПП до шумів, обумовленим дробовим ефектом, які посилені в фотоприймачі і в електронній схемі підсилувача ФПП, додаються шуми, що виникають у вхідних ланцюгах електронного підсилувача. Це, перш за все, тепловий шум опору навантаження фотоприймача і шум вхідного каскаду підсилувача.

Для визначення рівня шуму на виході фотоприймача використовують значення $I_{\text{ш}}^2$ помноживши його на коефіцієнт внутрішнього підсилення $G_{\text{ш}}$ для шумового струму. Величина $G_{\text{ш}}$ декілька перевищує величину коефіцієнта посилення G для струму сигналу через вклад в шум власного шуму внутрішнього посилення.

Висновки до розділу:

В даному розділі було розглянуто та проаналізовано основну літературу. Наведено схемні рішення та приклади технічної реалізації сучасних далекомірів та характеристика фотоприймачів. Виявлено основні тенденції розвитку далекомірів та їх фотоприймальних пристроїв.

РОЗДІЛ 2.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ ФОТОПРИЙМАЛЬНОГО ПРИБОРУ

Ефект «освітлення» оптики в результаті природного старіння скла був виявлений випадково і незалежно один від одного фотографами у різних країнах вже на початку ХХ століття. Було помічено, що об'єкти, що знаходяться в експлуатації декілька років, давали більш чітке та контрастне зображення порівняно з абсолютно новими аналогічними моделями [23]. Теоретичне пояснення цього факту було знайдено пізніше - на початку 1920-х років, знову ж таки, незалежно один від одного радянськими, німецькими та американськими оптиками. Було встановлено, що оптичне скло деяких сортів при контакті з вологим повітрям схильне до утворення на поверхні тонкої плівки окислів металів, солі яких легують зі склом. Явище «освітлення» було пояснено інтерференцією світла в тонких плівках. Достатньо швидко почалося впровадження даного ефекту в виробництво лінз. Перші технології освітлення фактично відтворюють процес природного старіння поверхні скла за допомогою травлення.

У Державному оптичному інституті був запропонований і інший процес - окислення продуктів згоряння етилену при перевищенні окису. Просвітленні поверхні таких лінз були надзвичайно стійкими до зносу і дії води. Для польових біноклей та очкових лінз подібна технологія застосовувалася до 1980-х років. По мірі розвитку технологій вакуумного напилювання просвітлювальну плівку стали наносити як покриття (у англоязычних джерелах з'явився термін «Coated Lens»). Спочатку це були неорганічні матеріали, але з 1970-х років стали застосовуватися органічні плівки на основі високомолекулярних з'єднань. Покриття, що просвітлюють стало можливо наносити в кілька шарів, підвищуючи ефективність освітлення не тільки в одному діапазоні довжин хвиль, але і

в широкому спектрі, що особливо актуально для кольорової фотографії / кінозйомки / відео. В СРСР об'єкти з багатошаровим просвітленням мали в позначенні букви «МС» (наприклад, об'єктив «МС-Геліос-44М»), в англomовних джерелах зустрічалася аналогічна аббревіатура «МС» на латиниці (Multilayer Coating).

Просвітлення оптики - результат інтерференції світла, що відбивається від передніх і задніх кордонів просвітлюють плівок; вона призводить до взаємного "гасіння" відбитих світлових хвиль і, отже, до посилення інтенсивності світла, що проходить. При кутах падіння, близьких до нормального, ефект просвітлення максимальний, якщо товщина тонкої плівки дорівнює непарному числу чвертей довжини світлової хвилі в матеріалі плівки, а показник заломлення плівки задовольняє рівності $n_{22} = n_1 n_3$, де n_1 і n_3 - показники заломлення середовищ, що межують з плівкою (як правило, першою середовищем є повітря)[24]. Конструкція фотоприймального пристрою передбачає вхідне вікно – кремнієвий фільтр. Це вікно, як і інші оптичні деталі має свій коефіцієнт пропускання світлового потоку. Оскільки однією основних задач при створенні фотоприймача є підвищення його чутливості, необхідно мінімізувати втрати яскравості при проходженні світловим потоком оптичної системи.

За методикою нанесення і складу просвітлюючого покриття просвітлення буває фізичним (напилення в вакуумі) і хімічним (травлення). Травлення застосовували на зорі епохи просвітління.

Метод формування моно- і мультимолекулярних плівок був розроблений Ірвінгом Ленгмюром і його ученицею Кетрін Блоджетт в 1930х роках. На даний час дана технологія, названа методом Ленгмюра-Блоджетт, активно використовується у виробництві сучасних електронних приладів рис. 2.1

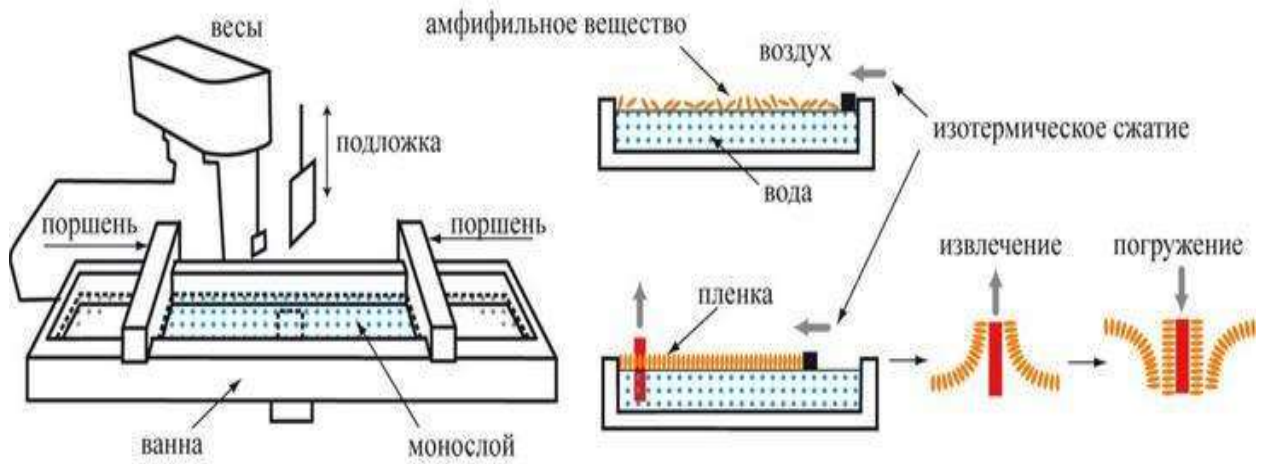


Рис. 2.1 Принципова схема отримання плівок Ленгмюра-Блоджетт[3].

Змінюючи товщину просвітлюючої плівки, можна змістити мінімум відбиття в різні ділянки спектру. Покриття з мінімальним віддзеркаленням у жовтій області ($\lambda = 555$ нм, область найбільшої чутливості людського ока) наносять на об'єктиви, що застосовуються в чорно-білій фотографії; у відбитому світлі їх поверхні мають пурпурний відтінок (т. н. блакитна оптика). У просвітлених об'єктивах для кольорової фотографії відображення мінімально в блакитній області спектра; відтінок їх поверхонь - бурштиновий.

Просвітлення оптичного скла з низьким показником заломлення за допомогою одношарових покриттів недостатньо ефективно. Однак одношарові покриття, нанесені на скло з коефіцієнтом заломлення 1,7, забезпечують майже трикратне зменшення коефіцієнта відбиття.

Застосування двошарових просвітлюючих покриттів дозволяє майже повністю усунути відбиття світла від поверхні для скла з різними показниками заломлення, але тільки у вузькій спектральній області.

Тришарові покриття, що просвітлюють дають можливість отримати рівномірно низьке (приблизно 0,5%) відбиття в широкому спектральному інтервалі, наприклад, у всьому видимому діапазоні.

Технологія виготовлення покриттів включає кілька операцій по підготовці оптичних деталей, герметизації, власне нанесення покриттів, контролю їх характеристик[26]. Найбільш поширеними є вакуумні і хімічні методи нанесення покриттів. До вакуумних відносяться конденсаційні методи, які використовують термічне випаровування і катодного розпилення плівкоутворюючих матеріалів. До основних хімічних методів належать метод травлення, утворення оксидних плівок з розчинів гідролізуючих з'єднань, осадження органічних полімерних плівок з розчинів в органічних розчинниках. Хімічні методи у порівнянні з вакуумними не вимагають дорогого устаткування і є більш економічними при отриманні найпростіших видів покриттів.

Однак в останні роки в оптичному приладобудуванні підвищилася питома вага і номенклатура покриттів, одержуваних вакуумними методами, так як останні відрізняються можливістю контролю основних технологічних параметрів в процесі нанесення покриттів, хорошою повторюваністю результатів і високою продуктивністю. Отримання якісних просвітлюючих покриттів здійснюється за допомогою вакуумних установок в умовах чистих приміщень з низьким вмістом пилу в повітрі.

Для нанесення покриттів на лінзи з органічного оптичного скла в основному використовуються методи, які не потребують обробки при високій температурі, наприклад, технологія нанесення покриттів іонно-плазмовим (катодних) розпиленням плівкоутворювальних матеріалів у вакуумі (матеріал катода піддається впливу іонів робочого газу в електричному полі, розпорошується, переноситься до деталі, конденсується на ній і утворює шар).

До сучасних технологій нанесення покриттів відносяться також плазмова полімеризація і магнетронне розбризкування. Також останнім

часом широко застосовується технологія нанесення золь-гель методом [27,28] зокрема и для HfO_2 [29].

Багато заводів-виробників дають власні назви покриттям, не розкриваючи їх технологічних параметрів, а обумовлюючи лише найважливішу для споживача характеристику - коефіцієнт відбиття або пропускання. Так, Еленьгурській оптичний завод (Польща), в останні роки перейшов на виробництво лінз зі скла власного варіння, виробляє такі одно- і багатошарові вакуумні антирефлексні (просвітлюючі) покриття:

* Одношарове покриття "AR1 Крокус", що забезпечує коефіцієнт пропускання 97% для лінз з коефіцієнтом заломлення 1,525 і 98,5% - для лінз з коефіцієнтом заломлення 1,706. Залежно від показника заломлення, відтінок відблиску варіюється від блакитно-фіолетового (1,525) до пурпурного (1,706);

* Багатошарове покриття "AR 2 Ірис" для лінз з коефіцієнтом заломлення 1,525 - 1,600, що забезпечує коефіцієнт пропускання до 99%. Покриття має зеленуватий відтінок відблиску. На думку виробника, дане покриття є одним з найміцніших в світі;

* Багатошарове покриття "AR3 Смарагд" з зеленуватим відтінком відблиску для лінз з органічного оптичного скла з показниками заломлення 1,495 - 1,600, яке забезпечує коефіцієнт пропускання до 99%. Крім того, це покриття зміцнює поверхню лінзи, володіє водовідштовхувальною дією і легко очищається від забруднень.

Дуже ефективними являються V-образні просвітлюючі покриття наприклад розглянемо зразок фірми Tydex:

Позначення «V-подібне» походить від V-подібної форми кривої залишкового відбиття (на противагу плівці MgF_2 , коли крива відбиття схожа на дуже пологому «U»). V-подібні покриття, що просвітлюють

складаються, як правило, з двох нерівнотовстих шарів оксидів з високим і низьким показником заломлення. Варіюючи товщини і показники заломлення шарів, можна досягти надзвичайно низьких втрат на заданій довжині хвилі. Зазвичай такі покриття конструюють для ліній генерації лазера. Конструкція оптимізується під робочий кут падіння світла.

Стандартне значення залишкового відбиття від кожної поверхні для V-образного покриття менш 0.25%
рис. 2.2 Досягнення величини $\leq 0.15\%$ також можливо за спеціальним запитом.

На відміну від одношарового просвітління MgF₂, дана структура може бути оптимізована для отримання зазначеного відображення на склі практично всіх марок і більшості кристалів.

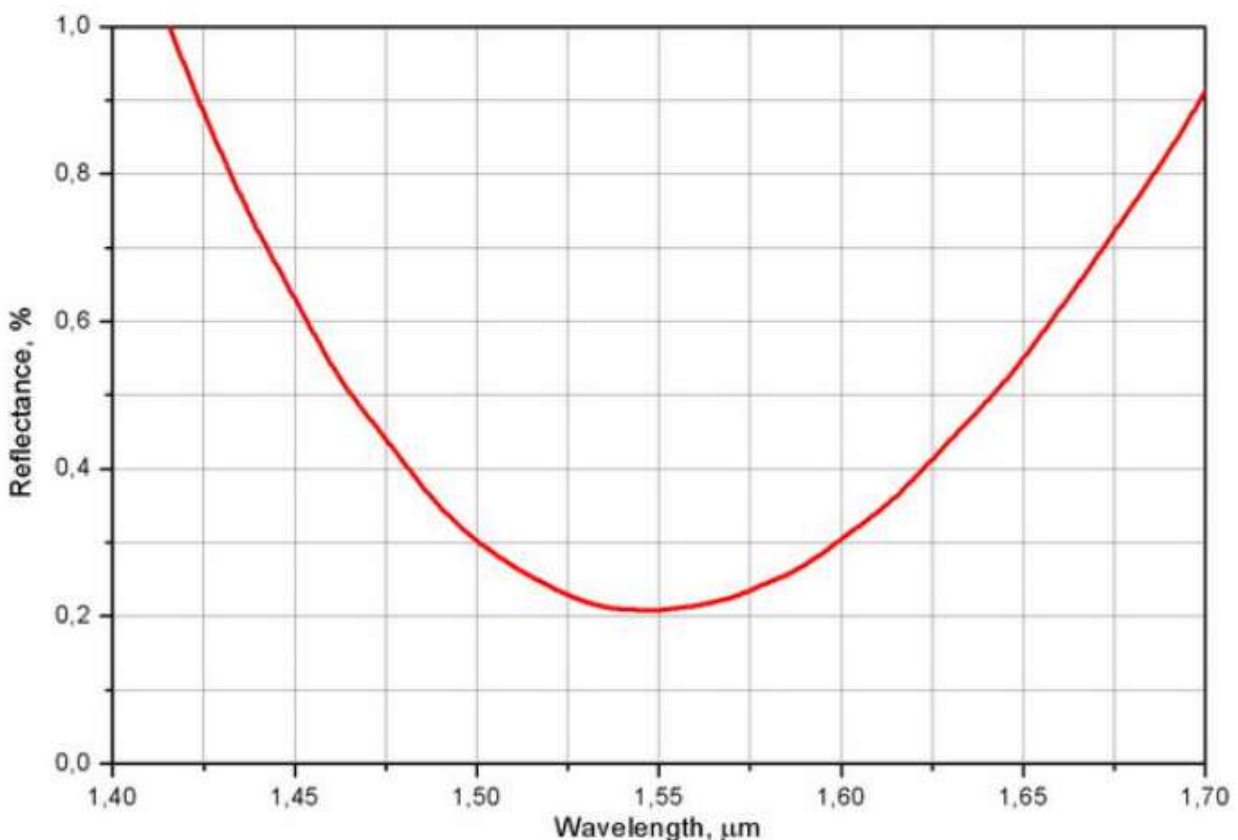


Рис. 2.2 Залишкове відбиття від виробу з К8 з V-подібним просвітленням на 1550 нм при нормальному падінні.

Коефіцієнт пропускання для будь якого прозорого об'єкту складається з[30]:

- Коефіцієнту поглинання матеріалу з якого виготовлений об'єкт, зменшити цей показник фактично не можливо і тому більше уваги потрібно приділити наступному показнику;
- Коефіцієнт відбиття R вимірюваний експериментальним шляхом або розраховуваний. Відбиття відбувається на межі розділу двох середовищ. Саме відбиття найбільше впливає на коефіцієнт пропускання, його і необхідно зменшити для підвищення ефективності роботи фотоприймача.

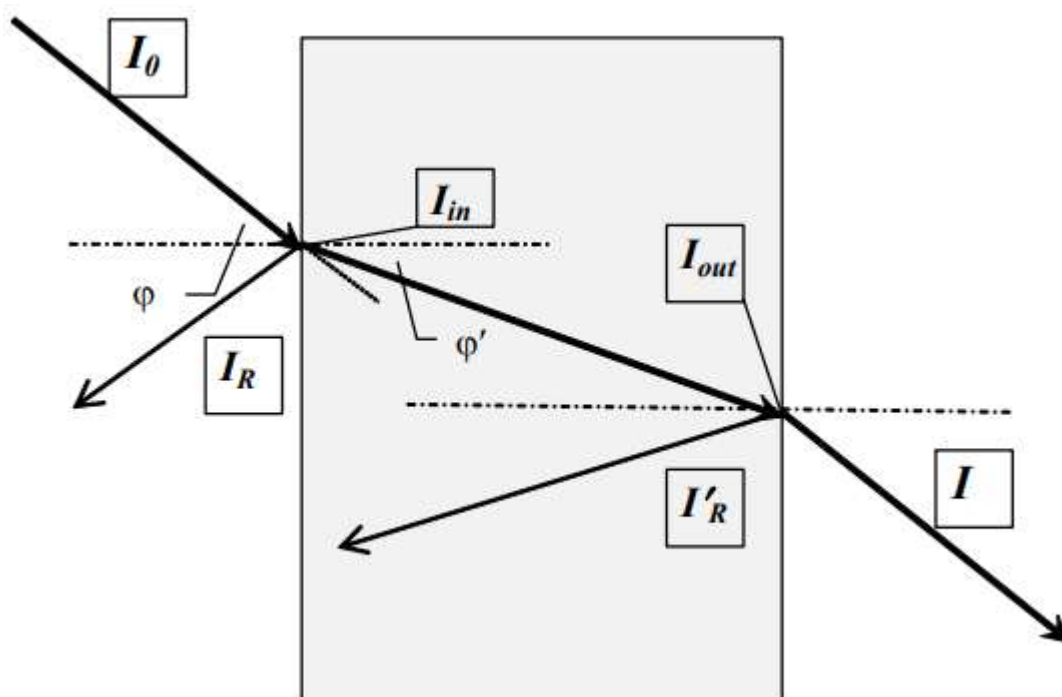


Рис. 2.3 Потік випромінювання при проходженні монохроматичного променя через пластину.

φ - кут падіння потоку; φ' - кут заломлення; I_{in} - потік, який увійшов в пластину; I_{out} - потік, що пройшов через пластину; I'_R - потік, відбитий від другої (внутрішньої) поверхні пластини; I - вийшовший з пластини потік. -падаючий потік оптичного випромінювання; -відбитий потік.

Характеристиками плоскопаралельної пластини є коефіцієнт зовнішнього пропускання τ , вимірюваний експериментальним шляхом, і коефіцієнт внутрішнього пропускання τ_{int} , який вираховується з коефіцієнта зовнішнього пропускання шляхом обліку відбиття (див. нижче)

$$\tau = I / I_0 = (1-R)^2 \quad (2.1)$$

$$\tau_{\text{int}} = I_{\text{out}} / I_{\text{in}} \quad (2.2)$$

У загальному випадку довільного кута падіння променя на межу розділу двох середовищ коефіцієнт відбиття R визначається відомими формулами Френеля 4,5, згідно з якими він є функцією значень оптичних постійних цих двох середовищ і значення кута падіння, а також залежить від поляризації падаючого променя.

Для променя, поляризованого перпендикулярно площині падіння:

$$R_s = \left[\frac{\sin(\varphi' - \varphi)}{\sin(\varphi' + \varphi)} \right]^2 = \left[\frac{n_1 \cos \varphi - n_2 \cos \varphi'}{n_1 \cos \varphi + n_2 \cos \varphi'} \right]^2 \quad (2.3)$$

Для променя, поляризованого паралельно площині падіння:

$$R_p = \left[\frac{\text{tg}(\varphi' - \varphi)}{\text{tg}(\varphi' + \varphi)} \right]^2 = \left[\frac{n_1 \cos \varphi' - n_2 \cos \varphi}{n_1 \cos \varphi' + n_2 \cos \varphi} \right]^2 \quad (2.4)$$

Конструкція фотоприймального пристрою передбачає вхідне вікно – кремнієвий фільтр. Це вікно, як і інші оптичні деталі має свій коефіцієнт пропускання світлового потоку. Оскільки однією основних задач при створенні фотоприймача є підвищення його чутливості, необхідно мінімізувати втрати яскравості при проходженні світловим потоком оптичної системи. Коефіцієнти заломлення кремнію залежно від довжини хвилі наведено в таблиці 2.1

Таблиця 2.1 Коефіцієнт заломлення кремнію в залежності від довжини хвилі.

λ , мікрон и	n	λ , мікрон и	n	λ , мікрон и	n
1.40	3.4900	4.50	3.4270	7.00	3.4227
1.50	3.4841	5.00	3.4256	7.14	3.4226
1.66	3.4700	5.28	3.4250	7.30	3.4225
1.82	3.4600	5.50	3.4246	7.50	3.4224
2.00	3.4561	5.70	3.4243	7.72	3.4222
2.50	3.4431	5.83	3.4241	8.00	3.4220
3.00	3.4360	5.92	3.4239	8.16	3.4220
3.30	3.4326	6.00	3.4238	8.50	3.4218
3.50	3.4317	6.50	3.4232	9.00	3.4216
4.00	3.4289	6.92	3.4228	9.09	3.4215

Кремній широко використовується для роботи в інфрачервоному діапазоні [31] в тому числі з лазерним випромінюванням виготовлення його займаються багато провідних фірм Edmundoptics, Alkor, Optotl, Tydex і т.д. В Tydex наприклад виготовляють:

- кремній оптичний, вирощений методом Чохральського (OCz-Si),

- кремній оптичний, вирощений методом зонного плавлення (FZ-Si),
- кремній високоомний оптичний, вирощений методом зонного плавлення (HRFZ-Si).

Їх пропускна здатність наведена на рис 2.4

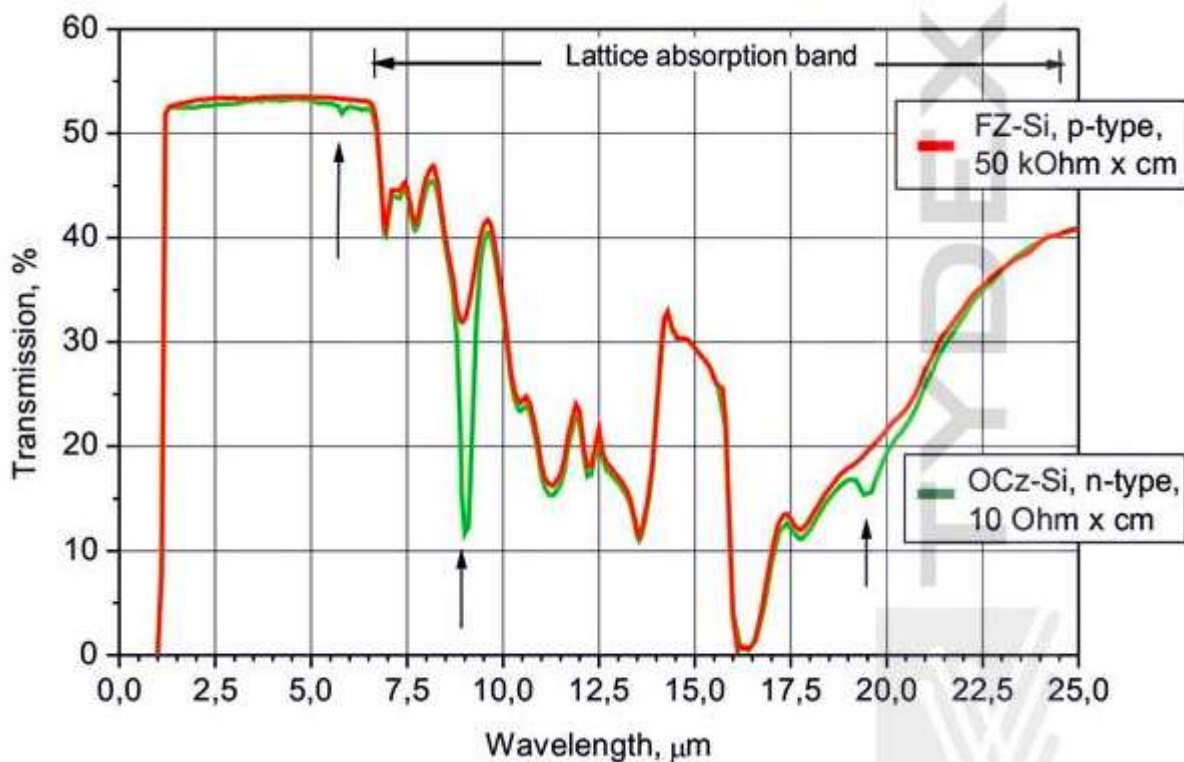


Рис. 2.4 Пропускна здатність кремнію в діапазоні 1-25 мікрон. Стрілками вказані піки кисневого поглинання. Товщина зразка 5 мм.

Для теоретичного розрахунку та моделювання шарів покриття оптичних деталей використовують програмне забезпечення таке як OptiLayer [32,33].

Загалом просвітлюючі покриття можна поділити на два види[34]:

- Одношарове просвітлення:

Товщина просвітлюючого шару (наприклад, кремнієвої кислоти) дорівнює 1/4 довжини світлової хвилі. В цьому випадку

промені, відбиті від її зовнішньої і внутрішньої сторін, загасяться внаслідок інтерференції і їх інтенсивність стане рівною нулю. Для найкращого ефекту показник заломлення просвітлюючі плівки повинен дорівнювати квадратному кореню показника заломлення оптичного скла лінзи. Найбільш підходящим матеріалом для просвітлюючої плівки є фторид барію, що володіє досить низьким ($n = 1,38$) показником заломлення. Однак, фторид барію розчинний у воді і вимагає нанесення захисного покриття.

В даний час одношарове просвітлення часто використовується для лазерної оптики, розрахованої на роботу в вузькому спектральному діапазоні. Головною перевагою такого просвітління є його дешевизна.

- Багатошарове просвітлення:

Багатошарове покриття представляє собою послідовність чергуючихся шарів (їх число досягає 15 і більше) з двох (або більше) матеріалів з різними показниками заломлення. Багатошарові покриття, що просвітлюють характеризуються низькими втратами на відбиття (вузькосмугові покриття для лазерної оптики з відбивною здатністю близько 0,3% і менше, широкосмугові - до 0,5%). Основна перевага багатошарового просвітління стосовно фотографічної і спостережної оптики - незначна залежність відбивної здатності від довжини хвилі в межах видимого спектру.

Також важлива товщина просвітлюючого шару [35] та контроль процесу нанесення.

Оскільки в останні роки багато уваги приділяється екологічній безпеці та саме безпечним джерелам енергії, багато робіт присвячено сонячним панелям. Враховуючи, що там в якості матеріалу використовується кремній та енергія отримується в тому числі з інфра-

червоного діапазону, способи просвітлення можна розглянути з цієї області[36,37,38]

Вхідне вікно фотоприймального пристрою необхідно для виділення вузького діапазону ІЧ спектру. Воно виготовлено з монокристалу кремнію n^- слабо легovanого (30–40%). Мінімальна товщина вікна обмежена необхідною міцністю проте воно не повинно бути надто товстим, адже від цього зменшується коефіцієнт його пропускання.

В наших умовах, враховуючи спектральний діапазон роботи пристрою (1,5–1,7мкм.), краще підійде одношарове просвітлююче покриття, так як нам не потрібна чутливість в широкому спектральному діапазоні [39]. Для плоского вікна з кремнію коефіцієнт відбиття на цих довжинах хвилі рівний 35–40% [40].

Скориставшись стандартом для вибору покриття оптичних деталей [41], можна підібрати покриття задовольняюче наші потреби \diamond 90 ІЭ – це одношарове оптичне покриття HfO_2 (Двоокис гафнію) товщиною 400 нм.

Відомі такі нанесення двоокису гафнію вирощування реактивним розпиленням під високим тиском [42], підходящого для інфрачервоного діапазону рис. 2.5

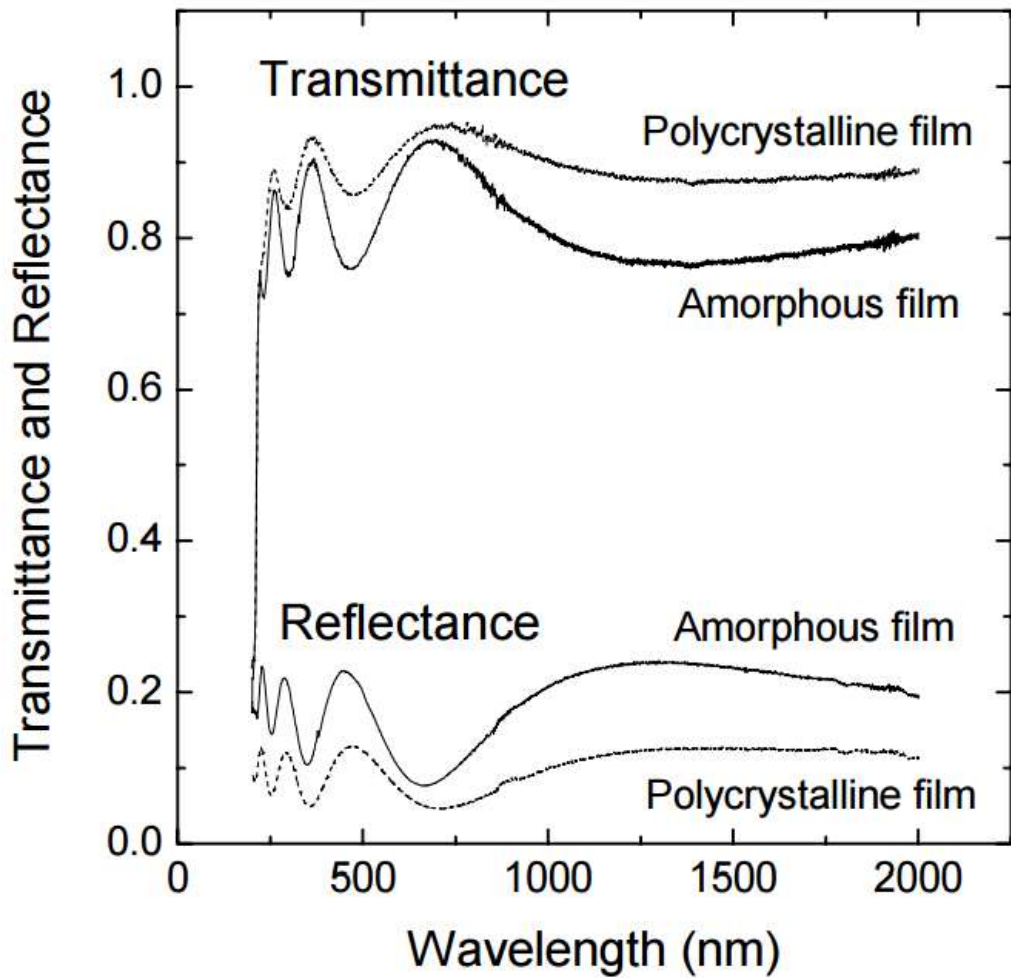


Рис. 2.5 Нанесення двоокису гафнію

Фотоприймальний модуль імпульсного лазерного далекоміра на
 ведений на рис. 2.6

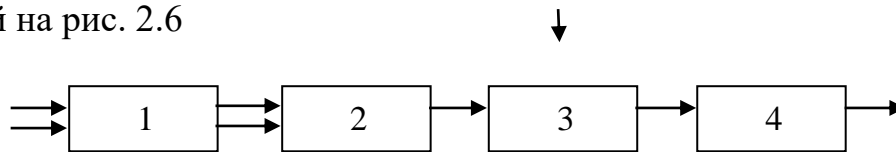


Рис. 2.6 Блок-схема фотоприймального модуля лазерного
 далекоміра:

1 – вхідна оптична система, 2 – вузькосмуговий оптичний фільтр, 3 – швидкодіючий імпульсний фотодіод, 4 – трансімпедансний широкосмуговий імпульсний підсилювач

1 – вхідна оптична система являє собою об'єктив, призначений для збирання відбитого від цілі лазерного випромінювання та його концентрації (фокусування) на активній площі фотодіода. У модернізованому лазерному далекомірі планується використання оптичної системи, яка використовувалась у далекомірах з робочою довжиною хвилі 1,06 мкм. При використанні лазерного випромінювання з довжиною хвилі 1,54-1,55 мкм слід перевірити ефективність оптичної системи як з точки зору оптичних втрат, так і фокусування випромінювання на активну площу фотодіода.

2 – вузькосмуговий (інтерференційний) оптичний фільтр, призначений для переважачого пропускання лазерного випромінювання у спектральному діапазоні довжин хвиль та пригнічення оптичних фонових завад, що покращує співвідношення сигнал-шум фотодіода.

3 – швидкодіючий імпульсний фотодіод для спектрального діапазону 1,54-1,55 мкм виготовляється на основі Ge та InGaAs p-i-n – структур або лавинних фотодіодів на основі цих матеріалів. В Інституті фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України історично розвивається напрям виготовлення фотоприймачів на основі Ge фотодіодів, сформованих дифузійним способом, що зумовлює малі шуми (високу чутливість) та малий темновий струм. В табл. 2.2 представлені результати впливу температури на параметри Ge p-n-переходів власного виготовлення.

Таблиця 2.2. Електричні параметри ВАХ дифузійного Ge p-n-переходу за різних температур.

T, K	I ₀ , A	β	R _s , Ом	I ₁ , A	I ₂ , A	I ₃ , A
248	6,5·10 ⁻¹⁰	1,1	385	1,8·10 ⁻⁸	2,1·10 ⁻⁸	2,24·10 ⁻⁸
286	1,5·10 ⁻⁸	1,2	364	7,2·10 ⁻⁸	7,8·10 ⁻⁸	1,7·10 ⁻⁷
300	1,8·10 ⁻⁷	1,2	265	6,9·10 ⁻⁷	7,2·10 ⁻⁷	8,4·10 ⁻⁷
335	2,4·10 ⁻⁶	1,3	146	3,0·10 ⁻⁵	6,2·10 ⁻⁵	3,7·10 ⁻⁴

Примітка. Обробка ВАХ Ge *p-n*-переходу здійснювалась за

формулою
$$i = i_0 \left[\exp\left(\frac{e(U - i \cdot R_s)}{\beta k T}\right) - 1 \right]$$
, де i_0 - передекспоненційний множник, β – коефіцієнт неідеальності, k - стала Больцмана, R_s – послідовний опір, I_1 , I_2 , I_3 – струми ВАХ при зворотних напругах зміщення U , В: 0,5; 1,0 та 3,0, відповідно. Активна площа фотодіода становить $S=1,2 \times 10^{-2}$ см².

Вимога до швидкодії фотодіода пов'язана з блоком вимірювання часових інтервалів імпульсного далекоміра. Відстань до цілі визначається за передніми фронтами СТАРТ імпульсів від вихідного (лазера) випромінювання та передніми фронтами СТОП імпульсів від відбитого від цілі випромінювання. Оцінки точності вимірювання відстані до цілі менші 1 м вимагають можливість реєстрації передніх фронтів імпульсів порядку 1×10^{-9} нс.

4 - важливим блоком фотоприймального модуля лазерного далекоміра є його широкосмуговий (~1 ГГц) імпульсний підсилювач із зворотнім зв'язком, який називається транімпедансним підсилювачем. Його основна перевага – відсутність необхідності здійснювати будь-яку корекцію. Шуми такого підсилювача можуть бути меншими ніж у підсилювачів без корекції та власного шуму фотодіода. Від'ємний зворотній зв'язок зменшує вплив паразитних індуктивностей на частотну та перехідну характеристики підсилювача та забезпечує низький вхідний опір ($R_{вх} \approx 50$ Ом), узгоджуваний з навантажувальним опором фотодіоду. Це дає можливість реалізації системою фотодіод-підсилювач R-C

ланцюжка з швидкістю порядку 1×10^{-9} с. Основна проблема трансїмпедансних підсилювачів – забезпечення їх стійкої роботи. Використання досить протяжного ланцюга зворотнього зв'язку може призводити схему підсилювача до самозбудження на високих частотах. Для запобігання самозбудження підсилення необхідна ретельна компоновка фотодіода з підсилювачем в одному корпусі та ефективно екранування відповідних елементів схеми. Підсилений до необхідного рівня сигнал фотодіода за спеціальною програмою і надсилається до електронного блоку вимірювання часових інтервалів далекоміра.

До важливих параметрів фотоприймального модуля лазерного далекоміра, які слід мінімізувати або оптимізувати при виготовленні дослідного зразка слід віднести наступне:

1. Рівень шуму фотодіода та підсилювача в значній мірі обумовлюється його темновим струмом, що зобов'язує обирати фотодіоди з мінімальним рівнем темного шуму за спеціальною програмою, що буде розроблена на другому етапі. Відомо, що темновий струм фотодіода експоненціально залежить від температури, тому фотодіод та підсилювач фото приймальної системи повинен розміщуватись у спеціальному корпусі з охолодженням.

2. Забезпечення необхідної швидкодії системи фотодіод-підсилювач шляхом оптимізації R-C ланцюжка фотодіода.

3. Максимум спектральної характеристики фотодіода повинен співпадати або бути близьким до робочої довжини хвилі лазерного випромінювання, що забезпечує робочі характеристики системи.

2.1 Відомі дослідження фотоприймачів на основі германію для діапазону 1,5-1,7 мкм

В роботі [46] наведено схемне рішення та результати роботи фотоприймального пристрою на основі германію.

Останнім часом широкого поширення набули оптичні системи передачі і прийому сигналів. Прийом оптичного сигналу в таких системах здійснюється модулями, основу яких складає фотоприймач, що задає якість сигналу, дальність зв'язку і швидкодію всієї системи. При цьому, використовувані раніше в оптоелектронних схемах прості фоторезистори стали практично повністю витіснитися різними напівпровідниковими фотоприймачами на основі р-п-переходу, зокрема швидкодіючими лавинними фотодіодами, фотодіодами р-і-п-типу, а також фотоприймачами з внутрішнім посиленням типу біполярного і польового транзисторів. Однак їх широке застосування вимагає рішення відповідних проблем.

Для лавинних фотодіодів характерним є «догляд» робочої точки як через їх розігрів внаслідок протікання струму, так і від не значного коливання робочої напруги, оскільки максимальний коефіцієнт множення спостерігається в області близькій до пробної при $V_{\text{раб}} \sim V_{\text{проб}}$. У цьому режимі при великій інтенсивності освітлення концентрація носіїв сильно зростає, і вони екранують область об'ємного заряду р-п-переходу, внаслідок чого знижується напруженість електричного поля в ньому, що призводить до зменшення коефіцієнта множення. Проблемою також є необхідність зменшення тунельних струмів до прийнятних значень [47].

У фотодіодах р-і-п-типу для отримання високої фоточутливості товщину шару об'ємного заряду необхідно збільшити, а для забезпечення максимальної швидкодії - зменшити, тобто необхідний пошук компромісного варіанту. У цьому аспекті, як зазначено в [48], перспективними є дослідження, спрямовані на оптимізацію параметрів базової області і вибір режимів включення фоточутливих багатобар'єрних структур [49].

Таким чином, основною вимогою, що пред'являються до використовуваних в оптичних системах зв'язку фотоприймачах, є

можливість прийому оптичних сигналів малої інтенсивності, мінімальний рівень яких визначається фоточутливістю фотоприймача і темновим струмами. До числа таких фотоприймачів можна віднести біполярні фототранзистори, посилення струму яких більше, ніж у звичайних фотодіодів, а інтегральна чутливість дорівнює [50, 51]

$$S_{\phi} = S_{\phi d} b \quad (2.5)$$

де $S_{\phi d}$ - струмова чутливість колекторного переходу транзистора;

b - коефіцієнт посилення транзистора.

У біполярних транзисторах площа колекторного переходу значно більше площі емітерного переходу, при цьому для отримання більшої напруги пробою концентрація носіїв в ньому повинна бути менше. Така асиметрія суттєво впливає на фотопідсилюючі властивості транзистора, які залежать від схеми включення та фізичної структури транзистора, що залишається маловивченим [52].

2.2 Експериментальні зразки і методика експерименту

Конструкція досліджуваної транзисторної структури на основі германію приведена на рис. 2.7 Базова область n-типу товщиною 1 мкм і площею 1 мм², що утворює колекторний перехід, отримана дифузією сурми. На частині її поверхні сплавом індію, що створює дифузійний шар р-типу, сформована сильнолегованих емітерна область товщиною 0,5 мкм.

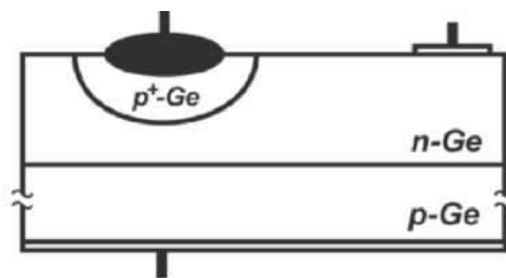


Рис. 2.7. Дифузійно-сплавна транзисторная р⁺- n-p-структура на основі германію

Дослідження фотоелектричних характеристик проводили на основі статичних вольт-амперних характеристик (ВАХ), виміряних за схемою із загальним колектором. Зокрема, на перехід «колектор - база» подавали пряму зміщену напругу від окремого джерела величиною 0,10 і 0,15 В. ВАХ вимірювали ламповим вольтметром ВК 7-21А. Підсвічування колекторного переходу здійснювали електричною лампою розжарювання (з яркостної температурою нитки розжарювання $T = 2850$ К). Інтенсивність освітлення вимірювали люксометром Ю116, а вольт-фарадні характеристики (ВФХ) - за допомогою вимірювача ємності Л2-28.

Результати досліджень та їх обговорення

Як видно з рис. 2.8. в режимі замикання окремо взятого $p^+ - n$ -переходу «база - емітер» при збільшенні напруги спостерігається порівняно плавне зростання зворотного струму (крива 1). У той же час, для послідовно з'єднаного

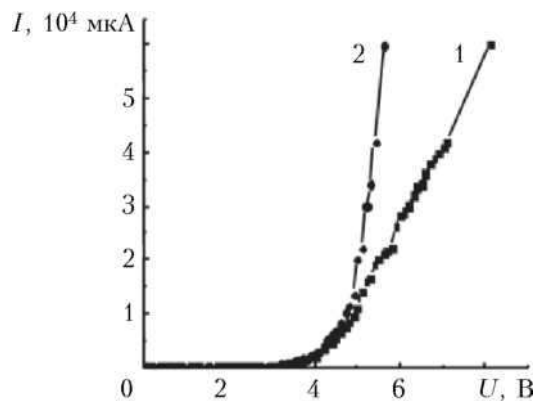


Рис. 2.8. ВАХ переходів «база - емітер» (1) і «колектор - емітер» (2)

з ним колекторного $p^+ - n$ -переходу в режимі прямого зміщення ток зростає більш різко (крива 2), що можна пояснити ефектом динамічного змикання області об'ємного заряду емітерного переходу з областю об'ємного заряду колекторного переходу, коли реалізуються умови подвійної інжекції носіїв в повністю збуднену (безбазову) область транзистора [31]. В даному режимі цей транзистор можна використовувати в якості низьковольтного обмежувача - «стабілізатора» напруги [32], коефіцієнт обмеження якого можна визначити як

$$Z = \frac{\ln(R_D / R_{\max \text{ огр}}) - \ln(R_D / R_{\max \text{ проб}})}{\ln I_{\text{огр}} - \ln I_{\text{проб}}} = \frac{\ln(R_{\max \text{ проб}} / R_{\max \text{ огр}})}{\ln(I_{\text{огр}} / I_{\text{проб}})}, \quad (2.6)$$

R_D - опір по постійному струму; $R_{\max \text{ огр}}$ - максимальний опір обмеження;

$R_{\max \text{ проб}}$ - максимальний опір при пробі; значення струму обмеження і струму при пробі.

Процес змикання переходів підтверджується вимірами вольт-фарадної характеристики (рис. 2.9.), а саме: в режимі замикання емітерного переходу загальна ємність зменшується до деякого мінімального значення при напрузі 2 В, яке зберігається аж до 3,5 В, а потім спостерігається її поступове зростання. При зміні напруги в діапазоні 2,0 - 3,5 В ємність, обумовлена змиканням областей об'ємного заряду, залишається практично незмінною, а в подальшому за рахунок виникнення дифузійної ємності емітерного переходу спостерігається її збільшення.

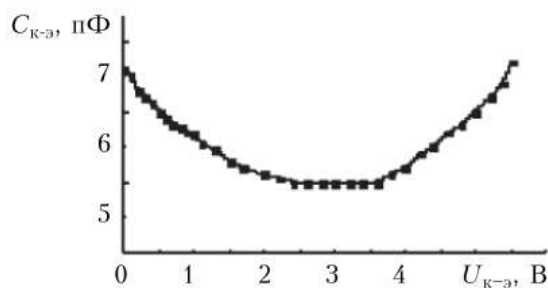


Рис. 2.9. ВФХ р⁺-п-р структури в режимі запирання емітерного переходу

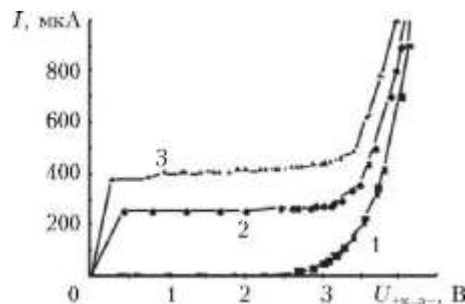


Рис. 2.10. ВАХ $p^+ - n - p$ -структурт в режимі запирання емітерного переходу при різних значеннях напруги на переході «коллектор—база»:

1 — 0 В; 2 — 0,10 В; 3 — 0,15 В

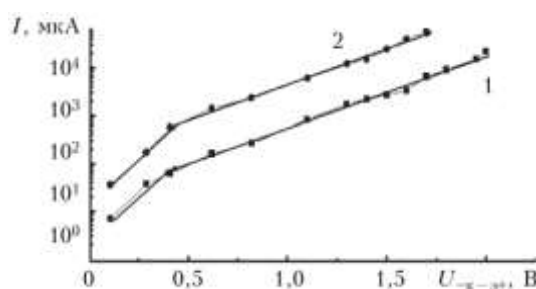


Рис. 2.11. ВАХ транзисторної структури при освітленості 50 лк (1) и 3000 лк (2)

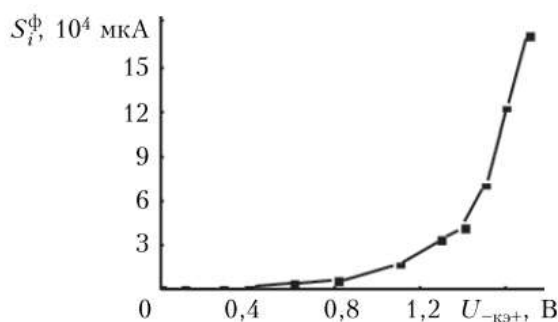


Рис. 2.12. Залежності токової фоточутливості германієвої $p^+ - n - p$ -структури від робочої напруги

В даному режимі включення при опорі навантаження в ланцюзі живлення 200 Ом отримані вольт-амперні характеристики при відсутності прямої напруги на переході «коллектор - база» і при його наявності. Як видно з рис. 2.12. при досягненні напруги 4,8 В всі криві сходяться в одній точці, причому на відміну від режиму включення з загальним емітером струми мають більш насичений характер, а значить, більше вихідний опір. При зміні полярності робочої напруги, тобто в режимі включення з загальним емітером, при відсутності напруги в базовій області структура має високу фоточутливість. Характер залежності струму від напруги такий же, як і в разі змикання областей об'ємного

заряду колекторного і емітерного переходів, тобто завершується різким зростанням.

Характерним для досліджуваного транзистора є те, що при підсвічуванні базової області інтегральним освітленням заданої інтенсивності (50 і 3000 лк) генерується світловий струм, величина якого в міру збільшення робочої напруги істотно зростає. На рис. 2.12. видно, що залежність струму від напруги експоненціальна і складається з двох ділянок: на першій ділянці показник експоненти дорівнює 4,25, на другому - 10,8, як і в інжекційно-польовому фотодіоді [33]. В інтервалі напруг від 0 до 1,7 В струмова чутливість збільшується до 17 мкА / лк (рис. 3.1.6), що в 17 разів більше фоточутливості фототранзистора ФТГ-5 [34].

На фотодіодах експериментально підтверджений динамічний діапазон не менше 3-х порядків, це відповідає відомим показникам аналогів і прототипів, які використовуються в далекомірах.

2.3 Виготовлення та пасивація розроблених Ge p-n переходів за новим конструкторсько-технологічним рішенням

Ge *p-n* переходи виготовлялись методом дифузії акцепторної домішки In у підкладки Ge *n*-типу провідності марки ГЭС-15. Поверхня підкладок з кристалографічною орієнтацією (100) оброблялась за стандартною процедурою [36]: 1) двостороннє абразивне шліфування і полірування поверхонь; 2) зняття порушеного шару методом хіміко-динамічного полірування з використанням поліруючого протравлювача СР-4; 3) знежирення і очищення поверхні підкладок від залишків хімічних реакцій у киплячому ізопропиловому спирті та у дистильованій воді; 4) просушування в атмосфері аргону. Така підготовка поверхні підкладок забезпечувала відсутність порушеного шару на поверхні підкладок, що вибірково контролювалось вимірюванням півширини кривих гойдання рентгенівського дифракційного відбиття за методикою

викладеною в [37], а також контролем морфологічної якості поверхні металургійним інтерференційним мікроскопом МІІІ-4. Надалі відібрані за якістю робочої поверхні підкладки товщиною 600–650 мкм разом з дифузантом завантажувались у різні місця кварцової ампули: внизу ампули розташовували дифузанти (індій), а на відстані 5–6 см групу із 3–5 підкладок Ge розміром $8 \times 8 \text{ мм}^2$. Ампула вакуумувалась за допомогою форвакуумного та дифузійного насосів з обов'язковим використанням охолоджуваної рідким азотом пастки для газів, що дозволяло забезпечувати рівень вакууму в ампулі $\sim(3-5) \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. У процесі відкачки, при досягненні необхідного рівня вакууму, ампула запаювалась. Підготовлені вакуумовані кварцові ампули із розташованими у них дифузантами і підкладками поміщали у температурне поле вертикально встановленої дифузійної печі, яка попередньо виводилась на заданий тепловий режим. В зоні джерела дифузії температура складала $630 \pm 10^\circ\text{C}$, а в зоні дифузії індію у підкладки $680 \pm 10^\circ\text{C}$. Температура у зоні джерела дифузії та у зоні дифузії підтримувалась із точністю не гірше $\pm 1^\circ\text{C}$. Глибина *p-n*-переходу регулювалась часом проведення дифузії. Після дифузії ампула виймалась із реакційної зони дифузійної печі та повільно охолоджувалась на повітрі. Після вивантаження підкладок Ge з *p-n*-переходами відбувався контроль якості поверхні підкладок та перевірка якості *p-n*-переходу термозондом. На відібраних таким чином приладних структурах визначалась робоча сторона на якій надалі формувались мезаструктури і вона захищалась хімічно стійким лаком (ХСЛ), а протилежна сторона структури разом з боковими областями страплювалась хімічним поліруючим протравлювачем СР-4 на глибину значно більшу, ніж ймовірна глибина *p-n*-переходу, тобто на 60–70 мкм. Після очищення поверхні приладних структур від ХСЛ та залишків продуктів хімічного травлення робоча поверхня очищалась від окислів, які сформувались у процесі дифузії і підтравлювалась у киплячому

перекисі водню на глибину 0.3–0.5 мкм. Глибина травленого шару контролювалась за допомогою мікроскопа МІІ-4. Надалі на робочу поверхню структур термовакuumним способом наносились круглі контактні площадки діаметром 0.6 мм з тонких (1–2 мкм) плівок олова легованого індієм, а на протилежну сторону структури суцільну плівка такої ж товщини з олова легованого сурмою. Металеві контактні плівки наносились на обидві сторони приладних структур у вакуумній установці ВУП-4 при вакуумі не гіршому за $(6-7) \cdot 10^{-5}$ мм. рт. ст. Процес нанесення відбувався на нагрітих до температури ~ 250 °С поверхнях приладних структур. Після нанесення металевих плівок на приладні структури контактні площадки на робочій поверхні та активна площадки поруч з ними розміром 1.0×1.0 мм² захищались ХСЛ, а суцільна металева плівка на протилежній стороні захищалась повністю. Після просушування ХСЛ у нагрітій до 30–40 °С атмосфері аргону на приладних структурах методом хімічного травлення у поліруючому протравлювачі СР-4 [36] виготовлялись мезаструктури, глибиною 40–50 мкм, яка перевищувала глибину *p-n*-переходу майже у 2–3 рази. Надалі здійснювалась технологічна операція очищення поверхні мезаструктур від ХСЛ та залишків продуктів хімічного травлення.

З метою підвищення надійності та строку служби фотоприймачів було розроблене нове конструкторсько-технологічне рішення щодо пасивації *p-n*-переходів германієвих фотоприймачів. В якості пасивуючого захисного шару товщиною 0,5-1,5 мкм нами було обрано високоізолюючий матеріал ZnSe, який має максимальне наближення за коефіцієнтом термічного розширення до германію та високу технологічність для термічного напилення.

Моделювання Ge *p-n* переходів та контроль їх електричних параметрів

Основні параметри, які необхідно враховувати для розробки фотоприймального пристрою:

1. Ампер-ватна чутливість.
2. Спектральна залежність фоточутливості.
3. Динамічний опір фотодіода.
4. Диференційна ємність.
5. Постійна часу.
6. Робоча температура.

ВАХ *p-n* переходів

Параметри і характеристики виготовлених *p-n* переходів вимірювались у відповідності з ГОСТ 17772-88 [38]. На рис.2.13. показана типова ВАХ Ge *p-n* переходу при кімнатній температурі, у якій прямому зміщенню відповідає позитивна полярність прикладеної напруги на *p*-області переходу. Характер ВАХ – різкий ріст прямого струму і незначна зміна зворотного струму до відносно великих напруг ~ 20 В – свідчить про високу якість переходу.

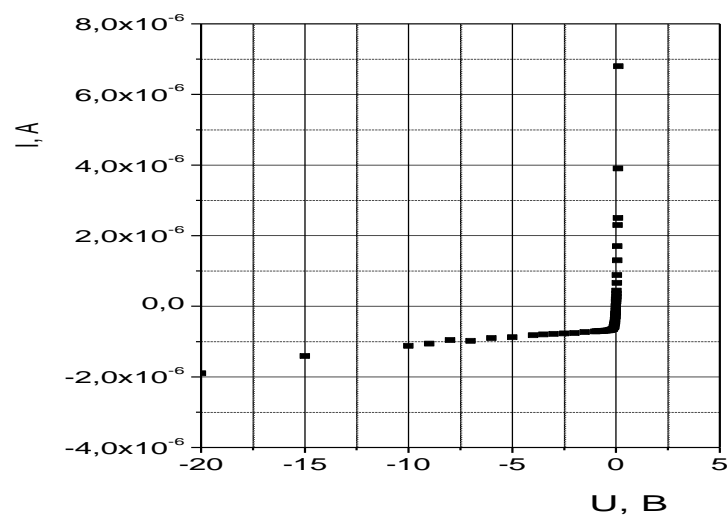


Рис.2.13. Типова ВАХ дифузійного Ge *p-n* переходу при $T=297$

К.

Вольт-фарадні характеристики

Структура виготовлених переходів визначалась із вимірів ємності на частоті 1 МГц. Моделювалась ситуація для *p-n* переходу з різким та плавним (лінійним) розподілом легуючої домішки [39,40,41]. Для цього експериментальні результати будувались у координатах C^2-U та C^3-U , рис. 2.14. Як видно з рис.2.14. (б), експериментальні результати краще лінеаризуються для плавного розподілу легуючої домішки.

Ємність переходу можна розрахувати за формулою

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 A}{W},$$

(2.7)

де W – товщина області просторового заряду, A – площа *p-n* переходу, ε_0 та ε діелектрична стала та діелектрична проникливість напівпровідника, відповідно. При лінійному розподілі домішки ширина ОПЗ визначається формулою

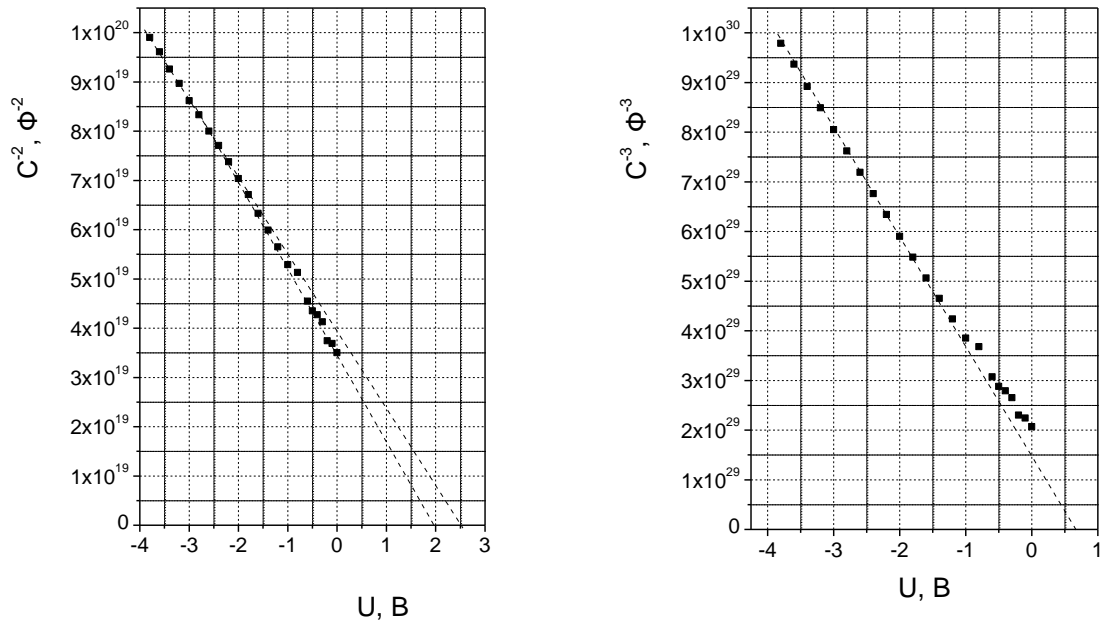


Рис.2.14. ВФХ дифузійних Ge *p-n*, побудовані для різкого (а) та плавного (б) розподілу легуючої домішки при T=297 К.

$$W = \left[\frac{12\epsilon\epsilon_0}{ea} (U_k - U) \right]^{1/3},$$

(2.8)

де a – градієнт концентрації легуючої домішки, U_k – контактна різниця потенціалів. Для моделювання розподілу необхідно враховувати метод реалізації процесу дифузії, коефіцієнту дифузії легуючої домішки, температури та часу дифузії. До переваг *p-n* переходів з плавним розподілом легуючої домішки слід віднести меншу ємність, у порівнянні з переходами з різким розподілом, що потенційно може зумовити більш високу швидкодію фотодіодів [40].

ВАХ Ge *p-n* переходів

ВАХ переходів вимірювалась у відповідності з ГОСТ 17772-88 на постійному струмі в інтервалі температур 248-335 К. Вимірювальна установка дозволяла реєструвати струм в діапазоні 10^{-9} - 10^{-2} А, а діапазон напруги зміщення становив 0-400 В. Виміряні ВАХ показані на рис.2.15.

Табл. 2.3. Електричні параметри *p-n* переходів, визначені по ВАХ

T, К	I_0 , А	R_0 , Ом	B	R_s , Ом
335	$1.6 \cdot 10^{-6}$	$2.1 \cdot 10^4$	1.2	152
297	$1.2 \cdot 10^{-7}$	$5.3 \cdot 10^5$	1.3	463
248	$1.1 \cdot 10^{-9}$	$4.6 \cdot 10^7$	1.4	634

Примітка. Прямі ВАХ моделювались для дифузійного механізму переносу заряду [40,41].

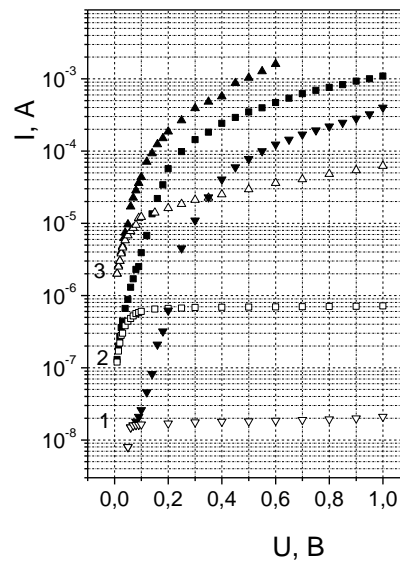


Рис. 2.15. ВАХ Ge *p-n* переходу при температурах 248 (1), 297 (2) та 335 К (3). Закриті та прямі точки – прямі та зворотні ВАХ, відповідно.

Спектральна фоточутливість.

Спектральна чутливість *p-n* переходів вимірювалась згідно ГОСТ 17772-88 на установці з синхронним детектуванням сигналу на частоті модуляції випромінювання 663 Гц. Як джерело випромінювання використовувалась кварцово-галогенна лампа КГМ-250.

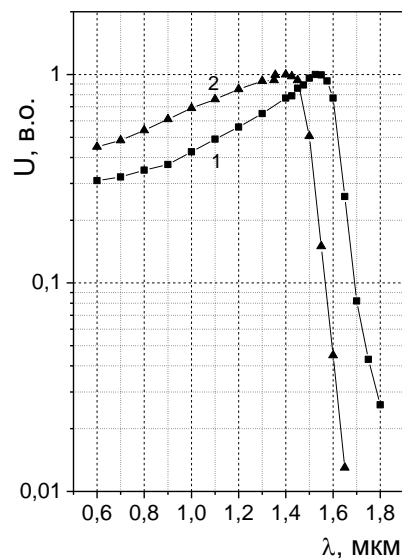


Рис. 2.16. Спектральна фоточутливість Ge *p-n* переходів при температурах 297 К (1) та 248 К (2).

Табл. 2.4. Фотоелектричні параметри

Параметр	Робоча температура, К	
	297	248
Область спектральної фоточутливості, мкм	0.6 – 1.8	0.60 – 1.56
Максимум фоточутливості, мкм	1.54	1.40
Ампер-ватна чутливість в максимумі, А/Вт	0.43	0.58
Постійна часу, <i>RC</i> , нс	5	3.7

Примітка: постійна часу вимірювалась при навантаженні 50 Ом та напрузі зворотного зміщення 5 В.

Висновок до розділу:

Конструкція фотоприймального пристрою передбачає вхідне вікно – кремнієвий фільтр. Це вікно, як і інші оптичні деталі має свій

коефіцієнт пропускання світлового потоку. Оскільки однією з основних задач при створенні фотоприймача є підвищення його чутливості, необхідно мінімізувати втрати яскравості при проходженні світловим потоком оптичної системи.

В даному розділі було розглянуто та вибрано найбільш ефективний метод просвітлення фотоприймального приладу. Також було розглянуто та досліджено різні способи підвищення чутливості фотоприймального пристрою, вибрано найбільш ефективний метод.

Для підвищення чутливості фотоприймального пристрою потрібно в подальшій роботі розробити просвітлююче покриття.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕГРАДАЦІЇ ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНИХ ЗРАЗКІВ

3.1 Дослідження можливої деградації експериментального зразка фотодіодного приймача розробленого та виготовленого на попередніх етапах роботи.

При виготовленні дифузійних Ge p-i-n фотодіодів були використані не стандартні технологічні операції: 1) новий спосіб пасивації активної ; 2) вдосконалена структура p⁺-p- та n⁺-n-типу мало шумних омичних контактів до p- та n-областей переходів. Деградація пасивуючого і захисного шару обумовить збільшення вкладу поверхневої компоненти струму в загальний темновий струм фотодіода, що може бути виявлено за вимірюванням зворотних ВАХ при різних температурах. Деградація омичних контактів спричинить суттєву зміну (збільшення) послідовного опору фотодіодів R_s, їх бар'єрну ємність та диференціальний опір R₀ при нульовій напрузі зміщення. Робочі параметри як вихідного, так і після річної витримки в лабораторних умовах визначались за формулою його темної ВАХ:

$$I = I_0 \left\{ \exp \left[\frac{e(U - I \cdot R_s)}{\beta k T} \right] - 1 \right\} \quad (3.1),$$

де I_0 – струм насичення, R_s – послідовний опір, β – коефіцієнт неідеальності.

В табл. 3.1 наведені параметри темної ВАХ дифузійного Ge p-i-n фотодіода, виготовленого у липні 2017 року, а в Табл. 3.2 – аналогічні параметри того ж фотодіода після річного зберігання в лабораторних умовах і атестованого у липні 2018 р.

Таблиця 3.1.

T, К	I_0 , А	R_0 , Ом	B	I_1 , А	$R_{ш}$, Ом	R_s , Ом
335	$1.6 \cdot 10^{-6}$	$2.1 \cdot 10^4$	1.2	$6 \cdot 10^{-5}$	$1.7 \cdot 10^4$	152
297	$1.2 \cdot 10^{-7}$	$2.8 \cdot 10^5$	1.3	$7.2 \cdot 10^{-7}$	$1.4 \cdot 10^6$	463
248	$1.1 \cdot 10^{-9}$	$2.7 \cdot 10^7$	1.4	$2.2 \cdot 10^{-8}$	$4.6 \cdot 10^7$	634

Таблиця 3.2.

T, К	I_0 , А	R_0 , Ом	B	I_1 , А	$R_{ш}$, Ом	R_s , Ом
316	$7.5 \cdot 10^{-7}$	$4.4 \cdot 10^4$	1.2	$3.8 \cdot 10^{-6}$	$5.3 \cdot 10^4$	165
293	$2.0 \cdot 10^{-7}$	$1.8 \cdot 10^5$	1.4	$7.0 \cdot 10^{-7}$	$2.8 \cdot 10^6$	385
250	$1.8 \cdot 10^{-9}$	$1.7 \cdot 10^7$	1.4	$2.4 \cdot 10^{-8}$	$5.0 \cdot 10^7$	520

Примітка. T – температура, при якій вимірювалась ВАХ; $R_0 = \beta kT / eI_0$ – формула, за якою оцінювалось значення R_0 при нульовій напрузі зміщення; I_1 – темновий струм при напрузі зворотного зміщення $U_1 = -1$ В; $R_{ш}$ – шунтуючий опір фотодіода при напрузі зворотного зміщення $U_1 = -1$ В.

Порівняння експериментальних значень параметрів ВАХ фотодіода I_0 , R_0 , I_1 , $R_{ш}$ свідчать про їх стабільність упродовж року зберігання в лабораторних умовах, що підтверджує стабільну дію нового пасивуючого і захисного шару. Помітні зміни (зменшення) відбулись зі значенням R_s , що може вказувати на зменшення контактного перехідного опору і правильності вибору структури омичних контактів у вигляді p⁺-p- та n⁺-n-структур. Не відбулось також і зміни механізму транспорту носіїв заряду крізь потенціальний бар'єр фотодіода, про що свідчать відповідні значення параметра неідеальності β . Значення $\beta = 1.4$ вказує на факт переважаючого вкладу дифузійної компоненти струму в загальний темновий струм фотодіода над генераційно-рекомбінаційною компонентою, для якої $\beta = 2$. Відмітимо, що із збільшенням температури вимірювання ВАХ значення β зменшується, що вказує і на збільшення вкладу дифузійної, а не тунельної компоненти струму у загальний темновий струм фотодіода. Саме з дифузійною компонентою струму

пов'язано можливість реалізації мінімального (теплого) шуму фотодіода, а значить, і його високої виявлювальної здатності.

Суттєвим чинником деградації матеріалу (параметрів) чутливої області Ge p-i-n фотодіодів, виготовлених дифузійним методом, може бути зміна енергії активації ΔE струму насичення I_0 . Зазначимо, що значення ΔE , згідно теорії транспорту носіїв заряду в бар'єрних структурах, однозначно вказує на домінуючий вклад одного з класичних (дифузійного або генераційно-рекомбінаційного) механізмів темного струму фотодіода. Для дифузійного механізму переносу заряду значення ΔE дорівнює ширині забороненої зони E_g германію при температурі абсолютного нуля, тобто $\Delta E = E_g \approx 0.74$ еВ. При генераційно-рекомбінаційному струмі значення ΔE становить $E_g/2 \approx 0.37$ еВ. Відсутність температурної активаційної залежності $I_0 = f(10^3/T)$ вказуватиме на домінуючу тунельну або поверхневу компоненту струму у темновому струмі фотодіода. Для більш точного встановлення ΔE у фотодіодах після їх річної витримки в лабораторних умовах значення I_0 визначалось з вимірювання прямих ВАХ зразка при п'яти різних температурах в інтервалі актуальних температур 250 – 316 К, які є найбільш імовірними при зміні погодних умов. Експериментальні результати наведені в табл. 3.3. Значення I_0 визначалось за екстраполяцією експоненціальної ділянки ВАХ до перетинину з віссю струмів.

Таблиця 3.3.

T, К	316	298	286	263	250
I_0 , А	$7.7 \cdot 10^{-7}$	$2.1 \cdot 10^{-7}$	$6.8 \cdot 10^{-8}$	$8.0 \cdot 10^{-9}$	$1.9 \cdot 10^{-9}$

Результати даних з I_0 , що приведені в Табл. 3.4, зображені на рис. 3.1 в координатах $[\ln I_0 - 10^3/T]$. Видно, що експериментальні дані лінеаризуються і взаємно паралельні (див. рис. 3/1, криві 1, 2), що вказує на активаційний характер температурної зміни струму насичення I_0 . Паралельність прямих свідчить про рівність значень ΔE у вихідного зразка і після річного його зберігання і підтверджує стабільність параметрів чутливої області дифузійного p-i-n фотодіода. Оцінимо значення ΔE в еВ за відомим виразом:

$$\Delta E = \frac{8.625 \cdot 10^{-2} \ln(I_{01}/I_{02})}{10^3/T_2 - 10^3/T_1}, \quad (3.2)$$

де T_1, T_2 – температури $T_1 > T_2$; I_{01}, I_{02} – значення струму насичення для температур T_1, T_2 відповідно.

Значення ΔE становило $\Delta E \approx 0.61$ eВ, що близько до значення E_g (Ge) при температурі абсолютного нуля і однозначно вказує на переважаючий вклад дифузійної компоненти в темновий струм.

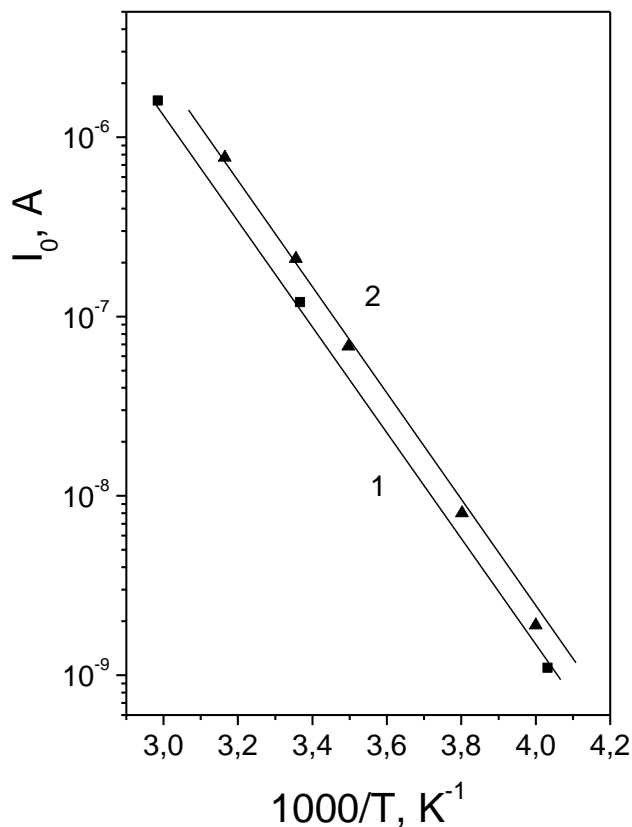


Рис.3.1 Залежність струму I_0 насичення від температури експериментального зразка при порівняльних випробуваннях липень 2017 р. (крива 1) – липень 2018 р. (крива 2)

3.2 Дослідження підвищення чутливості фотодіодного приймача за рахунок просвітлення кремнієвого вхідного вікна в робочому діапазоні хвиль.

Конструкція фотоприймального пристрою передбачає вхідне вікно – кремнієвий фільтр. В експериментальному зразку, розробленому протягом першого року, це вікно не мало просвітлюючого покриття, тому майже половина випромінювання не потрапляла у фотоприймач. На першому етапі

робіт 2018 р. в співпраці з ЦКБ «Арсенал» були проведені роботи з відпрацювання просвітлюючого покриття на робочу довжину хвилі пристрою. Було обране просвітлююче покриття за ОСТ 3-1901-85 \otimes 90 ИЭ, одношарове оптичне покриття HgO_2 товщиною 400 нм з обох сторін вікна.

Спектральні дослідження показали, що виготовлені зразки вікон у кількості 12 шт. мали пропускну здатність на робочій довжині хвилі (в діапазоні 1,5-1,7 мкм) 96%, тобто вдвічі збільшена кількість світлового випромінювання, яке фіксуватиметься фотоприймачем, а реальне підвищення чутливості цього пристрою буде визначене на другому етапі при тестуванні зібраного в корпусі фотоприймального пристрою.

3.3 Виготовлення та випробування двох нових експериментальних чутливих елементів (фотоприймачів).

З метою збільшення швидкодії Ge p-i-n фотодіодів за рахунок зменшення їх активної площі майже у 2 рази та збільшення товщини області просторового заряду виготовлено нову партію підкладок з Ge n-типу провідності типу ГЭС-15 і концентрацією електронів $\sim 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ при кімнатній температурі, що близько до концентрації власних носіїв заряду $n_i \approx 2.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

На рис. 3.2 наведені зображення морфології поверхні підкладки після абразивної планаризації (зліва) та після хіміко-динамічного полірування у протравлювачі СР-4. Глибина стравлюваного шару з обох боків підкладок становила ~ 150 мкм, що гарантує стравлювання порушеного шару, а фізичні параметри поверхні відповідають об'ємним. Шорсткість робочої сторони підкладки після хіміко-динамічного полірування становила $R_z \approx 0.07$ мкм, що задовольняє вимогам мікроелектроніки до цього параметру. На рис. 3.3 наведені зображення морфології поверхні структур з p-n-переходом, виготовлених дифузійним методом. Вдосконалений процес дифузії акцепторних домішок In та Zn проводився двотемпературним способом. Температура в зоні джерела дифузії дорівнювала $\sim 650^\circ\text{C}$, а в зоні дифузії $\sim 700^\circ\text{C}$. Глибина p-n-переходів становила ~ 20 мкм. Після дифузії шорсткість робочої поверхні збільшилась приблизно у 2 рази і становила $R_z \approx 0.16$ мкм, що не впливало на проведення фотолітографічної операції формування активної поверхні фотодіодів.

Чутливі елементи виготовлялись оригінальним методом бездефектної хімічної різки розміром 0.45×0.45 мм. Після формування контактних площадок чутливі елементи монтувались на на корпусах

польового транзистора для вимірювань їх характеристик. Загальний вигляд чутливих елементів показано на рис.3.4.



Рис.3.2. Зображення морфології поверхні підкладки після абразивної планаризації (зліва) та після хіміко-динамічного полірування у протравлювачі CP-4



Рис.3.3 Зображення морфології поверхні структур з р-п-переходом, виготовлених дифузійним методом



Рис. 3.4. Загальний вигляд чутливих елементів

Стабільність дифузійних Ge *p-i-n*-фотодіодів

Виготовлення активної області у Ge *p-i-n* та лавинних фотодіодах, призначених для реєстрації імпульсного лазерного випромінювання, як правило, здійснюється іонно-імплантаційним або дифузійним способами [44 – 46]. Важливою умовою експлуатації фотодіодів є надійність відтворювання їх робочих параметрів і характеристик під час експлуатації та зберігання, що в значній мірі пов'язано зі способом виготовлення. Так, наприклад, легування з конверсією типу провідності методом іонної імплантації потребує додаткових термообробок *p-n*-переходів, необхідних для активації легуючої домішки, а також рекомбінації дефектів радіаційної природи. Іншим недоліком іонно-імплантаційного способу виготовлення активної області фотодіодів є енергетична структура їх чутливої області: вона має різко асиметричний характер легування, p^+ -*n*- або *n*⁺-*p*-типу, що обумовлює зменшення ампер-ватної чутливості у порівнянні з симетрично легованими *p-n*-переходами.

Основні причини деградації напівпровідникових приладів, обумовленої структурними дефектами, розглянуто в роботах [47 – 50]. Якщо дефектна структура приладу формується в технологічному процесі його виготовлення, це призводить до відхилення характеристик виготовлених приладів від визначених у технічному завданні, тобто, до зменшення проценту виходу придатних до експлуатації приладів [47, 48]. Якщо ж дефектна структура виникає в процесі експлуатації приладу або його зберігання, це призводить до постійної деградації робочих параметрів і характеристик приладів, або до раптової відмови, тобто, до зменшення надійності приладу та терміну його експлуатації [49, 50]. Однією із основних причин деградації або відмови напівпровідникових приладів, в тому числі і оптоелектронних, є наявність в їх конструкції внутрішніх механічних напружень, релаксація яких обумовлює виникнення дефектів в активній області. Збільшення надлишкового струму та шуму в оптоелектронних приладах може обумовлюватись також і ненадійністю пасиваційних і захисних покриттів їх активної області [50, 51]. А тому важливим є дослідження стабільності робочих параметрів і характеристик дифузійних Ge *p-i-n*-фотодіодів в процесі їх зберігання в лабораторних умовах, особливо для з'ясування надійності пасиваційних і захисних покриттів їх мезаструктури.

Відомо [51], що деградація пасиваційних покриттів обумовлює збільшення поверхневого струму крізь активну область фотодіода, що вплине на зміну транспорту носіїв заряду і призведе до зміни параметрів його темної ВАХ. Встановлено, що ВАХ дифузійних Ge *p-i-n*-фотодіодів з новим пасиваційним покриттям та вдосконаленою структурою омичних контактів задовільно апроксимується виразом:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eU - IR_s}{\beta kT}\right) - 1 \right], \quad (3.3)$$

де I_0 – струм насичення, R_s – послідовний опір, β – коефіцієнт не ідеальності. Найбільш чутливими до зміни пасиваційних властивостей покриття мезаструктури є такі параметри ВАХ як I_0 та β , що надійно реєструють зміну (збільшення) поверхневого струму крізь активну область Ge *p-i-n*-фотодіода. В табл. 3.1 наведені параметри темної ВАХ, визначені за виразом (3.3), дифузійного Ge *p-i-n*-фотодіода, виготовленого у липні 2017 року, а в табл. 3.2 – аналогічні параметри ВАХ цього ж фотодіода після 15-місячного зберігання в лабораторних умовах і виміряних в кінці жовтня 2018 року. Зазначимо, що густина струму насичення I_0 в формулі (3.3) має різну енергію активації для дифузійного та генераційно-рекомбінаційного транспорту носіїв заряду крізь активну область фотодіода. Так, наприклад, при дифузійному механізмі транспорту носіїв заряду у тонких симетрично легованих *p-n*-переходах з різким розподілом легуючої домішки можливо оцінити I_0 за виразом [52]:

$$I_0 = en_i^2 \left[\frac{1}{p} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} + \frac{1}{n} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \right], \quad (3.4)$$

де n_i – концентрація власних носіїв заряду; p , n – концентрація основних носіїв заряду в *p*- та *n*-області переходу відповідно; D_n , D_p – коефіцієнти дифузії неосновних носіїв заряду в *p*- та *n*-областях переходу; τ_n , τ_p – час життя неосновних носіїв заряду в *p*- та *n*-області переходу відповідно. В той же час для генераційно-рекомбінаційного механізму транспорту носіїв заряду у того ж типу *p-n*-переходу струм насичення описується виразом [52]:

$$I_0 = \frac{en_i W_0}{2\tau_0}, \quad (3.5)$$

де W_0 – товщина області просторового заряду p - n -переходу; τ_0 – рекомбінаційний час життя носіїв заряду в області просторового заряду p - n -переходу. Як видно з виразів (3.4) та (3.5), найбільш температурно залежною величиною є концентрація власних носіїв заряду n_i [53]:

$$n_i = (N_c \cdot N_v)^{1/2} \exp(-E_g / 2kT), \quad (3.6)$$

де N_c , N_v – ефективна густина станів в зоні провідності та валентній зоні напівпровідника відповідно; E_g – ширина забороненої зони напівпровідника.

З формули (3.6) видно, що n_i експоненційно залежить від температури, причому для дифузійного механізму транспорту носіїв заряду крізь p - n -перехід енергія активації $I_0 (10^3/T)$ повинна становити $\Delta E = E_g$ (Ge) ≈ 0.74 еВ при температурі абсолютного нуля, а для генераційно-рекомбінаційного транспорту – в два рази менше.

У випадку тунельно-рекомбінаційного струму I_T крізь область просторового заряду p - n -переходу з протяжними дефектами (дислокаціями) пряма ВАХ описується виразом [54]:

$$I_T = I_0 \exp\left[\frac{e(U - IR_s)}{E_0}\right], \quad (3.7)$$

де I_0 – передекспоненційний множник, що майже не залежить від температури, E_0 – характеристична енергія. Відзначимо, що у тунельно-рекомбінаційного струму зворотна ВАХ не насичується, а її залежність від напруги зміщення апроксимується степеневою залежністю $I_{зг} \sim U^n$, де n – показник степені. Тобто за характером поведінки зворотної ВАХ p - n -переходу можливо якісно реєструвати наявність компоненти тунельно-рекомбінаційного струму у загальному струмі переходу. Крім того, якщо вважати, що $E_0 = \beta kT$, тоді для тунельно-рекомбінаційного струму значення коефіцієнта неідеальності буде $\beta > 2$ [47, 49, 52].

Таблиця 3.4.

Т, К	I_0 , А	R_0 , Ом	В	I_1 , А	$R_{ш}$, Ом	R_s , Ом
------	-----------	---------------	---	-----------	-----------------	---------------

335	1.6·10 ⁻⁶	2.1·10 ⁴	1.2	6·10 ⁻⁵	1.7·10 ⁴	152
297			1.3	7.2·10 ⁻⁷		463
248	1.2·10 ⁻⁷	2.8·10 ⁵	1.4		1.4·10 ⁶	634
	1.1·10 ⁻⁹	2.7·10 ⁷		2.2·10 ⁻⁸	4.6·10 ⁷	

Таблиця 3.5.

T, К	I ₀ , А	R ₀ , Ом	B	I ₁ , А	R _ш , Ом	R _s , Ом
312	3.2·10 ⁻⁷	9.2·10 ⁴	1.2	1.1·10 ⁻⁶	9.2·10 ⁵	168
289			1.4			472
249	6.7·10 ⁻⁸	3.7·10 ⁵	1.4	4.5·10 ⁻⁷	2.3·10 ⁶	630
	1.2·10 ⁻⁹	2.5·10 ⁷		2.4·10 ⁻⁸	4.9·10 ⁷	

Примітка. Параметр R₀ – диференційний опір, що визначався за формулою $R_0 = \frac{\beta k T}{e I_0}$ при нульовій напрузі зміщення, I₁ – темновий струм при напрузі зворотного зміщення U=-1 В; R_ш – шунтуючий опір фотодіода при напрузі зворотного зміщення U=-1 В.

Порівняння експериментальних значень параметрів ВАХ фотодіода I₀, R₀, I₁, R_ш, наведених в таблицях 3.4, 3.5, свідчить про їх стабільність упродовж 15-місячного зберігання в лабораторних умовах. Одночасно цей факт вказує і на надійність нового пасиваційного та захисного покриття, виготовленого на основі полікристалічного ZnSe. Досить помітна зміна значення R_s може бути пов'язаною зі зменшенням перехідного контактного опору їх структури у вигляді p⁺-p- та n⁺-n-структур. Важливим параметром темного струму ВАХ фотодіода є коефіцієнт неідеальності β, зміна якого з часом зберігання може вказувати на зміну механізму транспорту носіїв заряду крізь активну мезаструктурну область Ge p-i-n-фотодіода. Сталість його значення при відповідних температурах вимірювання ВАХ (див. табл. 3.4, 3.5) свідчить

про реалізацію одного і того ж механізму транспорту носіїв заряду. При $\beta < 2$ відсутній тунельно-рекомбінаційний струм у фотодіоді, що свідчить про відсутність дефектів в їх області просторового заряду і про стабільність пасивуючого та захисного покриття. Зменшення значення β від 1.4 при температурі $T=148$ К до 1.2 при температурі $T=335$ К вказує на реалізацію струму, близького до дифузійного, при якому шум фотодіода мінімальний (тепловий), що дає можливість реалізації високої виявлювальної здатності фотодіодом.

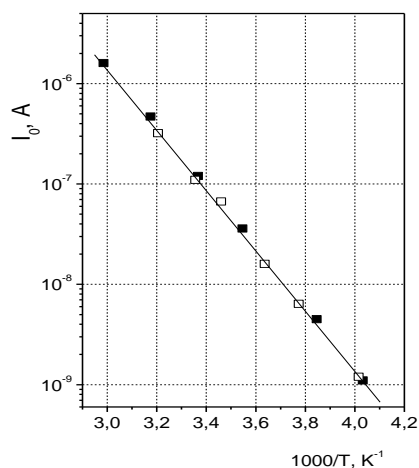
Суттєвим фактором деградації робочих параметрів досліджуваного Ge фотодіода під час його зберігання в лабораторних умовах є зміна механізму транспорту носіїв заряду, пов'язана як з генерацією дефектів в його активній області, так і з погіршенням пасиваційних властивостей нового покриття, що обов'язково обумовить зміну енергії активації струму насичення I_0 . В таблиці 3 наведені більш детальні дані для I_0 у фотодіода, виготовленого у липні 2017 року, і в таблиці 3.7 – аналогічні дані через 15 місяців їх зберігання в лабораторних умовах.

Таблиця 3.6.

T, K	248	260	282	297	315	335
I_0 , A	$1.1 \cdot 10^{-9}$	$4.5 \cdot 10^{-9}$	$3.6 \cdot 10^{-8}$	$1.2 \cdot 10^{-7}$	$4.7 \cdot 10^{-7}$	$1.6 \cdot 10^{-6}$

Таблиця 3.7.

T, K	249	265	275	289	298	312
I_0 , A	$1.2 \cdot 10^{-9}$	$6.4 \cdot 10^{-9}$	$1.6 \cdot 10^{-8}$	$6.7 \cdot 10^{-8}$	$1.1 \cdot 10^{-7}$	$3.2 \cdot 10^{-7}$



Результати температурної залежності $I_0=f(10^3/T)$ побудовані в напівлогарифмічних координатах і наведені на рисунку, з якого видно, що експериментальні дані задовільно апроксимуються прямими лініями з однаковим нахилом. Така поведінка кривих вказує на рівність енергій активації ΔE для температурної залежності I_0 як на початку дослідження (липень 2017 року), так і через 15 місяців зберігання фотодіода в лабораторних умовах, що свідчить про стабільність нового пасиваційного покриття і параметрів його активної області. Оцінимо значення ΔE в еВ за відомим виразом:

$$\Delta E = \frac{8.625 \cdot 10^{-2} \ln(I_{01}/I_{02})}{\frac{10^3}{T_2} - \frac{10^3}{T_1}}, \quad (3.8)$$

де T_1, T_2 – температури ($T_1 > T_2$); I_{01}, I_{02} – значення струмів насичення для температур T_1, T_2 відповідно. Значення ΔE для обох прямих становить $\Delta E \approx 0.61$ еВ, що близько до значення ширини забороненої зони Ge при температурі абсолютного нуля і цей факт свідчить про реалізацію у виготовленому Ge *p-i-n*-фотодіоді переважно дифузійного механізму транспорту носіїв заряду.

Спектри пропускання та відбиття аморфного та полікристалічного зразків HfO₂

Нанесення цього просвітлюючого покриття відбувалось випаровуванням за допомогою електронного нагріву. Випаровування даними способом здійснюють для нанесення покриттів тугоплавкими оксидами. Сучасні вакуумна установки забезпечені двома пристроями нагріву вихідної речовини електронами і за допомогою електронно-променевого випарника, який дозволяє локальний нагрів речовини до 5000С [43]. Серійно випускається електронно-променевий випарник УЕЛІ-1 включає електронну гармату, систему фокусування і повороту пучка електронів. Електрони випускаються нагрітим катодом, виконаним у вигляді спіралі з п'яти витків вольфрамової дроту діаметром 0,5 мм.

Слабо розходячийся електронний пучок формується системою, що складається з фокусуєчого катода, анода і електромагнітних призм, розгортається на 180° направляється на тигель. З метою рівномірного випаровування речовина підложку великими кутами і без бризок сфокусований пучок електронів діаметром 5 -8 мм сканують з частотою до 50 Гц по полю розміром до 30х30мм. Тигель з напилюваною речовиною охолоджується водою; для нанесення багат шарового покриття використовують випарники з декількома тиглями. Плівки, отримані таким способом, мають особливу чистоту і однорідність, так як розплавлена речовина не стикається зі стінками тигеля.

Недоліком даного методу є складність апаратури і високі вимоги до дотримання режимів техпроцесу нанесення плівки, що вимагає високої кваліфікації обслуговуючого персоналу.

В співпраці з ЦКБ «Арсенал» були проведені роботи по просвітленню пробних зразків кремнієвих фільтрів. Просвітлюючий шар HfO_2 був нанесений з обох сторін вікна таким чином зроблено повне одношарове просвітлення.

Спектральні дослідження показали, що виготовлені зразки вікон у кількості 12 шт. мали пропускну здатність на робочій довжині хвилі 96%, тобто вдвічі збільшена кількість світлового випромінювання, яке фіксуватиметься фотоприймачем.

Висновок до розділу:

Фотоприймач надійно сприймає імпульси випромінювача при потужності випромінювання у всіх випробуваннях.

Аналізуючи результати експериментальних досліджень показників фотоприймального пристрою, розробленого у 2017 р. (порівняння проводили показників липня 2017 р. з липнем 2018 р.), можна зробити

висновок, що за рік експериментальний зразок в межах похибок вимірювання зберіг початкові характеристики, тобто деградація не спостерігається.

Висновок:

В даній роботі було розглянуто методи просвітлення фотоприймального приладу, проаналізовано основну літературу, наведено схемні рішення та приклади технічної реалізації сучасних далекомірів. Проаналізовано та вибрано найбільш ефективний метод просвітлення фотоприймального пристрою. Досліджено деградацію параметрів фотоприймача з часом.

Для підвищення чутливості фотоприймального пристрою потрібно в подальшій роботі розробити просвітлююче покриття, систему підсилення сигналу та охолодження фотоперетворювача.

Список використаної літератури:

1. Лазерная дальнометрия / Л.А. Аснис, В.П. Васильев, В.Б. Волконский и др. М.: Радио и связь, 1995. 256 с
2. Вильнер В.Г. Методы повышения точности импульсных лазерных дальномеров /В.Г. Вильнер, А.И. Ларюшин, Е.Л. Рудь// М.: Электроника. Наука, технология, бизнес. -2008. -№3. -С. 118-123.
3. Менх Х. Оптически накачиваемый световодный лазер с улучшенной эффективностью // заявка на патент РФ №2008127875/28 от 23.11.2006
4. Тарабрин М. К., Лазарев В. А., Леонов С. О., Пнев А. Б., Карасик В. Е., Подмарьков Ю. П., Фролов М. П., Губин М. А. Перестраиваемый твердотельный лазер среднего ИК-диапазона с продольной накачкой диодной линейкой // патент РФ №164 950 от 09.03.2016
5. V A Lazarev, M K Tarabrin, A A Kovtun, V E Karasik, A N Kireev, V I Kozlovsky, Yu V Korostelin, Yu P Podmar'kov, M P Frolov and M A Gubin «Continuous-wave broadly tunable diode laser array-pumped mid-infrared Cr²⁺:CdSe laser» (Laser Physics Letters, 12, 125003, 2015, дата публикации: 18.11.2015, Интернет-адрес: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1612-2011/12/12/125003>Солодилов К.Е. Военные оптико-механические приборы, Оборонпром, 1940, 263 с.

6. Рогинский К. А., Карасик В. Е., Лазарев В. А., Леонов С. О., Пнев А. Б., Тарабрин М. К., Цапенко К. П. Твердотельный лазер среднего ИК-диапазона с накачкой диодной линейкой // патент РФ №148 558 от 30.06.2014
7. Ф.А. Большиков и др. «Генерация двухмикронного лазерного излучения в кристаллах $\text{NaLa}_{1/2}\text{Gd}_{1/2}(\text{WO}_4)_2$, активированных ионами Tm^{3+} » - Квантовая электроника, 40, №2, стр. 101-102, 2010
8. Герасимов Ф.Я., Говорухин Ф.М. Краткий топографо – геодезический словарь – справочник, 1968; М.Недра
Элементарный курс оптики и дальномеров, Воениздат 1938, 136 с.
Военные оптико – механические приборы, Оборонпром, 1940 ,263 с.
9. Карасик В.Е., Орлов В.М. Лазерные системы видения. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 352 с.
10. Сосновский, А. А. Авиационная радионавигация : справочник — М.: Транспорт, 1990. – 64с.
11. Пестряков В. В., Кузенков В. Д. Радиотехнические системы. Учебник для вузов — М.: Радио и связь, 1985. – 77с.
12. Задорожный И.С. Задорожный В.И, Задорожный Ю.И. Исследование и анализ состава и структуры оптико-электронных комплексов подвижных объектов // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія ПРИЛАДОБУДУВАННЯ. – 2008. – Вип. 35 – с. 5-15
13. "Система управления огнем танка Т-80У (Т-80УД)". Учебное пособие. 1988 г., 198 с.
14. Кирьяшкин И.Л., Колесников А.И., Моисеев В.В., Старостин М.М., Ткаченко В.И. Система передачи информации // патент РФ №94 032 407 от 06.09.1994
15. Орлов В.А. "Лазеры в военной технике". М. Воениздат, 1976, - 230с.
16. И.Н.Ананьев "Основы устройства прицелов", М. Воениздат, 1947 – 1948

17. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь, 1981.
18. Дальномеры. Принцип лазерной дальнометрии.[Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://pricel.com.ua/news/?blog_id=28
19. . Лезин Ю.С. Оптимальные фильтры и накопители импульсных сигналов. М.: Сов. радио, 1969.
20. Morcom J. Optical distance measurement. US Patent No. 6753950, June 22, 2004, US CI. 356/4.01, Int. CI. G01S 17/00; G01C 3/08.
21. Lee Seok-Hwan et al. Laser rangefinder and method thereof. Intern. Patent WO 2005/006016, 20.01.05, Int. CI Int. CI. G01S 17/10
22. Барышников Н.В., Бокшанский В.Б., Карасик В.Е. Приемопередающие устройства лазерных локационных изображающих систем. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 84 с.
23. Яштолд-Говорко В. А. Фотосъемка и обработка. Съемка, формулы, термины, рецепты. — 4-е, сокр.. — М.: Искусство, 1977.
24. Толстоба Н.Д., Цуканов А.А., ПРОЕКТИРОВАНИЕ УЗЛОВ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ / Н.Д. Толстоба, А.А. Цуканов – СПбГУ ИТМО, Санкт-Петербург, 2002г, – с.43.
25. Словарь нанотехнологических и связанных с нанотехнологиями терминов / под. ред. С.В. Калюжный – Москва, Физматлит 2010г – с. 172
26. Сулим А.В. Производство оптических деталей / А.В. Сулим – Высшая школа Москва, 1975 – с.274-277
27. Васькевич В. В., Синтез и исследование силикатных золь–гель-покрытий для микро- и нанoeлектроники / В. В. Васькевич, В. Е. Гайшун, Д. Л. Коваленко – Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии 2014, т. 12, № 2, с. 279–293

28. Пат. 2016113981 RU СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОСВЕТЛЯЮЩЕГО ЗОЛЬ - ГЕЛЬ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ / Пашкина Ю. О., Жималов А. Б., Геранчева О. Е., Заварина С. В. // 21.07.2017 Бюл. № 21
29. Борило Л. П. СИНТЕЗ И ФОТО-ХИМИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ И ДИСПЕРСНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ ОКСИДНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕМЕНТОВ III-V групп / реф. дис. др. хим. наук. Томского государственного университета – 2003
30. Ефимов А.М., ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ И МЕХАНИЗМЫ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ / А.М. Ефимов Н.Ф. Гусарова – СПбГУ ИТМО, Санкт-Петербург, 2008г, – с.29-40.
31. J. Ballato J. Silicon optical fiber /Ballato, T. Hawkins, P. Foy, R. Stolen, V. Kokuoz, M. Ellison, C. McMillen, J. Reppert, A. M. Rao, M. Daw, S. Sharma, R. Shori, O. Stafsudd, R. R. Rice, and D. R. Powers – OPTICS EXPRESS 10 November 2008 / Vol. 16, No. 23
32. Алтухов Р. С., Просветляющие покрытия для ИК-области / Р. С. Алтухов, Н. Ю. Никаноров, – Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. №2. – с. 51-53
33. Пат. 2016146950 РФ. Способ изготовления зеркала для твёрдотельного ВКР-лазера с длиной волны излучения 1,54 мкм/ Дьякова И.И., Кулагина Л. В. // 06.12.2017 Бюл. № 34.
34. Нордлинг К., Остерман Д. Справочник по физике для учёного и инженера / Перевод с англ. А.В. Бармасова. – СПб.:БХВ-Петербург,2011. –С.273-301.
35. Хафез А., Просветляющие покрытия для ИК-области спектра / Губанова Л. А., Хафез А. – Научно-технический вестник

информационных технологий, механики и оптики 2002г. № 1 (5) – с. 155-156

36. НЕМКОВА А. А., ПРОСВЕТЛЯЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЗАЩИТНЫХ СТЕКОЛ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ: дис. канд. тех. наук. Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург 2009

37. Гадамский О.Н. Высокоэффективные просветляющие наноструктурные оптические покрытия для солнечных элементов / О.Н. Гадамский, К.К. Алтунин, Н.М. Ушаков, И.Д. Кособудский, В.Я. Подвигалкин, Д.М. Кульбацкий – Журнал технической физики, 2010, том 80, вып. 7 – с. 85-88

38. Pat. 5907766A US. Method of making a solar cell having improved anti-reflection passivation layer / Richard M. Swanson Pierre J. Verlinden Ronald A. Sinton // 1999-05-25

39. Pat. 20060154044A1 US. Anti-reflection coating and optical element having such anti-reflection coating for image sensors / Kazuhiro Yamada Yasuhiro Sakai Hiroyuki Nakayama Maki Yamada // 2006-07-13

40. Рожков В.А., Родионов М.А., Просветляющие свойства пленок оксида эрбия / В.А. Рожков, М.А. Родионов – Письма в ЖТФ, 2005, том 31, вып. 2– с.67-68

41. ОСТ 3–1901–95. Покрытия оптических деталей. Типы, основные параметры и методы контроля. – Введ. 1995–07–06. М.: ЦНИИ «Комплекс», 1995. С. 32.

42. Martínez F. L., Optical properties and structure of HfO₂ thin films grown by high pressure reactive sputtering / F. L. Martínez, M. Toledano-Luque, J. J. Gandía, J. Cárabe, W. Böhne, J. Röhrich, E. Strub, I. Mártil – Journal of Physics D: Applied Physics, Volume 40, 2007 – p. 21

43. Канушиной Л.А., СПЕЦТЕХНОЛОГИЯ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ / Канушиной Л.А., Сосновым А.Н. – Новосибирск: СГГА, 2009 – с. 27-28
44. Большаков Т.Д., Самохвалов А.К., Уварова С.Д. и др. Способ изготовления и параметры Ge *p-i-n*-фотодиодов // Прикладная физика. – 2012. - № 4. – С. 115 – 119.
45. Канюесо Ф., Пирсолл Т., Поллак М. и др. Техника оптической связи. Фотоприемники / Под ред. У. Тоанга. – М.: Мир, 1988. – 526 с.
46. Анисимова И.Д., Викулин И.М., Зайтов Ф.А. и др. Полупроводниковые фотоприемники: ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазон спектра /Под ред. В.И. Стафеева. – М.: Радио и связь, 1984. – 216 с.
47. Рейви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии. – М.: Мир, 1984. – 472 с.
48. Тхорик Ю.А., Хазан Л.С. Пластическая деформация и дислокации несоответствия в гетероэпитаксиальных системах. – Киев: Наукова думка, 1983. – 304 с.
49. Венгер Е.Ф., Грендел М., Данилина В. и др. Структурная релаксация в полупроводниковых кристаллах и приборных структурах. Механизмы релаксации, методы исследования, роль в деградации приборов / Под ред. проф. Ю.А. Тхорика. – Киев: Феникс, 1994. – 113 с.
50. Конакова Р.В., Кордаш П., Тхорик Ю.А. Прогнозирование надежности полупроводниковых лавинных диодов. – Киев: Наукова думка, 1986. – 188 с.
51. Литвинов Р.О. Влияние поверхности на характеристики полупроводниковых приборов. – Киев: Наукова думка, 1972. – 116 с.
52. Сукач А.В., Тетьоркін В.В., Матіюк І.М. та ін. InAs фотодіоди (огляд) // Оптоелектроника и полупроводниковая техника. – 2015. – Вып. 50. – С. 17 – 43.

53. Шалимова К.В. Физика полупроводников. – М.: Энергия, 1976. – 416 с.
- . Сукач А.В., Тетеркин В.В. Трансформация электрических свойств InAs *p-n*-переходов в результате ультразвуковой обработки // Письма в ЖТФ. – 2009. – 35, № 11. – С. 67 – 75.